



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

**HYDRAULICKÁ ANALÝZA VODOVODNÍ SÍTĚ OBCE
TVAROŽNÁ**

HYDRAULIC ANALYSIS OF THE TVAROŽNÁ WATER SUPPLY SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Eva Trněná

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN RUČKA, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství obcí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Eva Trněná
Název	Hydraulická analýza vodovodní sítě obce Tvarožná
Vedoucí práce	Ing. Jan Ručka, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] INGEDULD, P., 2003: Modeling of Water Distribution Systems with MIKE NET, DHI Water & Environment, 2003
- [2] Rossman, A. L., 2000: EPANET 2 Users Manual, United States Environmental Protection Agency US E.P.A., USA, 9/2000
- [3] National Research Council of the national academies, 2006: Drinking Water Distribution Systems – Assessing and reducing Risks, the National Academic Press, Wasington D.C., ISBN: 0-309-10306-1, 2006
- [4] Odborné články ze seminářů a konferencí

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci bakalářské práce bude vytvořen hydraulický model vodovodní sítě obce Tvarožná v Jihomoravském kraji. K tvorbě modelu budou využity simulační softwarové nástroje Epanet 2.0, resp. MikeNet či Mike Urban. Studentka provede simulaci vybraných zatěžovacích stavů, které charakterizují hydraulický režim vodovodní sítě a posoudí tlakové poměry ve spotřebišti.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Jan Ručka, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá hydraulickou analýzou stávající vodovodní sítě obce Tvarožná. Práce je rozdělena do několika částí. V úvodní části seznamuje s účelem práce. Ve druhé části se zaměřuje obecně na matematické modelování vodovodních sítí, hydraulickou analýzu vodovodních sítí, popisuje použitý modelovací software Epanet 2.0 a nastiňuje současný stav výzkumu v oblasti matematického modelování vodovodních sítí. Třetí část práce podrobně rozebírá zájmové území a popisuje způsob zásobování obce pitnou vodou. Ve čtvrté části je popsán průběh měrné kampaně v zájmové lokalitě a její vyhodnocení, které bylo následně použito pro stavbu modelu. V páté části jsou popsány vstupní data a postup sestavení modelu v programu Epanet 2.0. Výsledkem hydraulické analýzy jsou tlakové poměry ve vodovodní síti, které jsou posouzeny s ohledem na platnou legislativu. Zhodnoceny jsou i hydraulické kapacity požárních hydrantů a jejich rozmístění v obci vzhledem k požadavkům daných normou.

KLÍČOVÁ SLOVA

hydraulická analýza, matematické modelování, vodovodní síť, tlakové poměry, zásobování požární vodou

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the hydraulic analysis of the existing water distribution system of Tvarožná village. The thesis is divided into several parts. The first part introduces the purpose of the work. The second part focuses on mathematical modeling of water distribution system, hydraulic analysis of water distribution system, describe Epanet 2.0 software that was used for modeling and review the current research on mathematical modeling of water distributions systems. The third part of the thesis analyzes in detail the studied area and describes drinking water distribution to the municipality. The fourth part describes the measuring campaign in the locality and its evaluation, which was subsequently used for the model construction. The fifth part describes the input data and the procedure for the model settings in the software Epanet 2.0. The results of the hydraulic analysis are the pressure conditions in the water distribution network, which are compared to the actual valid legislation. Also the hydraulic capacities of the fire hydrants and their location in the municipality are compared to the standard requirements.

KEY WORDS

hydraulic analysis, mathematic modeling, water distribution system, pressure ratios, fire water supply

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Eva Trněná *Hydraulická analýza vodovodní sítě obce Tvarožná*. Brno, 2017. 59 s., 10 s. příl.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního
hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2017

.....

Eva Trněná

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu této bakalářské práce panu Ing. Janu Ručkovi, Ph.D za rady a připomínky týkající se této práce a také za ochotu a vstřícnost. Dále patří poděkování panu Ing. Petru Hlaváči z SVK Šlapanicko za podané informace potřebné ke zpracování této práce a za milý přístup. Děkuji zástupcům VAS, a.s. za poskytnuté údaje pro zpracování této práce. Jmenovitě patří díky panu Šmerdovi, paní Ing. Vavřinové, paní Ing. Doležalové, paní Ing. Kropáčkové, panu Železnému a panu Prokeši. Poděkovat chci také mým rodičům a manželovi za podporu a trpělivost.

OBSAH

1	ÚVOD.....	9
1.1	STÁVAJÍCÍ STAV VODOVODU OBCE TVAROŽNÁ.....	9
1.2	CÍL PRÁCE.....	10
2	MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ VODOVODNÍCH SÍTÍ.....	11
2.1	HYDRAULICKÁ ANALÝZA VODOVODNÍCH SÍTÍ	11
2.1.1	Typy hydraulické analýzy	13
2.1.2	Vstupní data	13
2.1.3	Zadávání odběrů	14
2.1.4	Základní podmínky hydraulické analýzy	15
2.1.5	Epanet 2.0	16
2.2	STÁVAJÍCÍ STAV VÝZKUMU V OBLASTI MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ VODOVODNÍCH SÍTÍ	19
2.3	VÝZKUM PRO PRAKTICKÉ VYUŽITÍ SIMULAČNÍCH MODELŮ V BĚŽNÉM PROVOZU ..	21
3	ŘEŠENÁ LOKALITA – OBEC TVAROŽNÁ	22
3.1	POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ	22
3.1.1	Charakter zástavby.....	23
3.2	ZPŮSOB ZÁSOBOVÁNÍ PITNOU VODOU.....	23
3.2.1	Skupinový vodovod	23
3.2.2	Vodojem Mokrá.....	23
3.3	ZDROJ VODY	24
3.4	ÚPRAVA VODY	25
3.5	ROZVODNÁ VODOVODNÍ SÍŤ OBCE	26
3.5.1	Vodojem Tvarožná	29
3.6	MAJETKOPRÁVNÍ VZTAHY	31
3.7	JAKOST VODY VE SPOTŘEBIŠTI.....	31
4	MĚRNÁ KAMPAŇ	33
4.1	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	34
5	HYDRAULICKÁ ANALÝZA.....	36
5.1	VSTUPNÍ DATA A STAVBA MODELU	36

5.2	ZATĚŽOVACÍ STAVY	38
5.2.1	Tlakové poměry pro jednotlivé zatěžovací stavy	40
5.3	PŘESNOST KALIBRACE MODELU	41
5.4	ZÁSOBOVÁNÍ POŽÁRNÍ VODOU.....	42
5.5	LEGISLATIVNÍ POŽADAVKY.....	45
5.6	POSOUZENÍ TLAKOVÝCH POMĚRŮ VODOVODNÍ SÍTĚ OBCE TVAROŽNÁ	46
5.7	POSOUZENÍ NA ZÁSOBOVÁNÍ POŽÁRNÍ VODOU	48
5.8	DOPORUČENÍ	48
6	ZÁVĚR.....	50
7	POUŽITÁ LITERATURA.....	51
	SEZNAM TABULEK	53
	SEZNAM GRAFŮ.....	54
	SEZNAM OBRÁZKŮ	55
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	56
	SEZNAM PŘÍLOH.....	58
	SUMMARY	59

1 ÚVOD

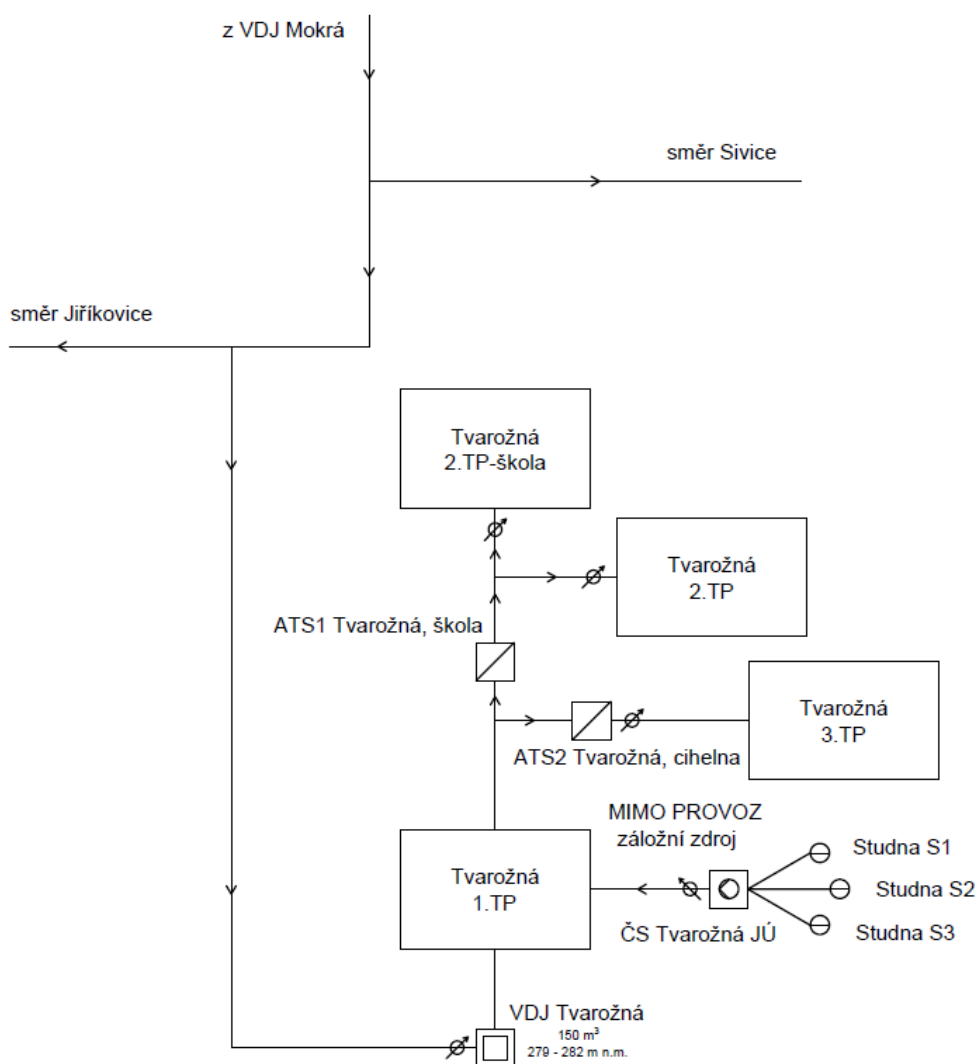
K hydraulické analýze vodovodní sítě se v současnosti využívá matematické modelování, které zjednodušeně převádí určitý reálný systém do abstraktního prostředí matematiky tak, aby se simulovaný model vodovodní sítě co nejvíce podobal realitě, ale zároveň tak, aby pomocí relativně jednoduchých matematických vyjádření základních fyzikálních vztahů popisoval stav a děje, které ve skutečném vodovodním systému probíhají. Výsledkem hydraulické analýzy jsou základní hydraulické veličiny jako je tlak, průtok, rychlost proudění atp. v celé simulované vodovodní síti. Tyto informace slouží většinou pro potřeby provozu a řízení stávajících distribučních systémů nebo může být modelována nová vodovodní síť pro optimalizaci jejího návrhu [1]. Matematické modelování vodovodních sítí je v současné době používáno stále častěji. Pro matematické modelování vodovodních sítí existuje celá řada softwarových prostředků. Neustále jsou vyvíjeny nové metody a postupy se snahou zdokonalit přesnost výstupů.

Tato práce se zaměřuje na hydraulickou analýzu reálné vodovodní sítě v obci Tvarožná. Snahou je přinést podrobné informace o tlakových poměrech ve všech místech rozvodné sítě obce a posoudit, zda odpovídají právním předpisům. Zaměřuje se i na požární bezpečnost staveb s ohledem na zásobování požární vodou, k čemuž lze výsledky hydraulické analýzy také použít. Posuzuje požární hydranty na požadavky dané normou a přináší závěrečná doporučení pro zlepšení provozu a požární bezpečnosti.

V úvodní části je lehce přiblížen řešený vodovod. Bližší informace o zájmovém území a způsobu zásobování pitnou vodou jsou uvedeny v kapitole 3. Řešená lokalita-obec Tvarožná.

1.1 STÁVAJÍCÍ STAV VODOVODU OBCE TVAROŽNÁ

Vodovod v obci byl budován postupně, nejstarší části pocházejí z roku 1975. Další z 90. let a nejnovější z roku 2008 a 2009. Technický stav vodovodu je vzhledem k jeho stáří dobrý. Do rozvodné vodovodní sítě obce Tvarožná přitéká voda z jediného zásobovacího vodojemu obce Tvarožná. V rozvodné síti v obci jsou umístěny dvě automatické tlakové stanice (dále ATS). Jedna je umístěna v budově základní školy a navyšuje tlak pro odběrná místa u školy a v části Krhon. Druhá ATS je v ulici Hlinky a navyšuje tlakové poměry pro novou zástavbu V Cihelně a pro odběrná místa v horní polovině ulice Hlinky. Ostatní části obce jsou zásobovány z vodojemu gravitačně. Vodojem Tvarožná je zásobován gravitačně skupinovým vodovodem z vodojemu Mokrá. Zdrojem vody pro skupinový vodovod jsou podzemní vrty v lokalitě Řičky (sdělení Ing. P. Hlaváč, SVK Šlapanicko). Na obrázku 1-1 je znázorněno jednoduché schéma zásobování obce Tvarožná pitnou vodou.



Obr. 1-1 Schéma zásobování obce Tvarožná pitnou vodou (sdělení Ing. V. Vavřinová, VAS, a.s.)

1.2 CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je sestavení matematického modelu a provedení hydraulické analýzy stávající vodovodní sítě obce Tvarožná v simulačním softwaru Epanet 2.0. Budou simulovány zatěžovací stavy, které charakterizují hydraulický režim vodovodní sítě během dne. Výsledkem bude přehled a posouzení tlakových poměrů v rozvodné síti z hlediska platné legislativy ČR. V rámci práce bude také zhodnocena vodovodní síť s ohledem na zásobování požární vodou.

2 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ VODOVODNÍCH SÍTÍ

Matematické modelování se využívá téměř ve všech oblastech lidské činnosti. Simulace založené na matematických modelech jsou aplikovány v technických oborech, přírodních vědách, v ekonomii, informatice nebo v sociálních vědách. Prostřednictvím matematického modelu získáváme srozumitelný popis všech relativních faktorů a podstatné informace o vztazích mezi jednotlivými prvky sledovaného systému. Matematický model je abstraktní model, který k popisu chování daného systému využívá matematický zápis. [2]

Vodovodní síť představuje tlakový trubní systém, který lze matematickým modelem dobře popsat. Podle realizovaných úloh a cílových dat, která chceme z modelu obdržet, můžeme matematické modely popisující vodovodní síť rozdělit na dva typy: hydraulickou analýzu a kvalitativní analýzu. Hydraulická analýza slouží k určení základních hydraulických veličin jako je průtok, rychlost proudění, tlaková ztráta atd. Pro potřeby hydraulické analýzy je v matematickém modelu použita základní fyzika – hydraulika. Kvalitativní analýza popisuje jakost vody a stáří vody v trubní síti, využívá se především za účelem stanovení koncentrací dezinfekčních činidel na bázi chlóru nebo pro určení doby zdržení znečištění v trubní síti při hygienických haváriích. Pro matematické modelování je kvalitativní analýza složitější, kromě hydrauliky je nutné aplikovat i průběhy chemických reakcí, které ve vodě probíhají. [1] [3]

2.1 HYDRAULICKÁ ANALÝZA VODOVODNÍCH SÍTÍ

Díky hydraulické analýze vodovodních sítí získáváme potřebné informace o průtokových a tlakových poměrech v těchto sítích, a to především pro potřeby provozování a řízení stávajících distribučních soustav, projekci nových trubních sítí, pro možné rozšiřování systémů, napojení nových odběratelů nebo také pro potřebu rekonstrukcí rozvodů. [1]

Modely stávajícího distribučního systému mohou být využívány v kombinaci s měřeními na reálné síti k detekci úniků pitné vody z potrubí nebo za účelem pozorování následků různých provozních jevů jako jsou odstávky zdrojů nebo úpraven pitné vody, opravy vodojemů či potrubí nebo živelné katastrofy. Získané informace z modelu lze vyhodnotit a případně upravit stávající systém tak, aby při plánovaných i neočekávaných provozních změnách lépe fungoval. V případě návrhu budoucích distribučních systémů nebo rozšiřování sítí představuje model neexistující síť, podle které jsou pak jednotlivé části systému dimenzovány. [1]

Údaje o průtocích a tlacích v určitém místě systému je možné získat také přímým měřením na síti. Ale ke zjištění těchto informací pro celý distribuční systém by bylo nutné osadit na síti velké množství měřících zařízení, což by sice bylo technicky proveditelné, ale ekonomicky by se jednalo o velmi neefektivní postup. [1]

Pro získání správných informací o tlakových a průtokových poměrech, které odpovídají reálné vodovodní síti, je nutné model zkalibrovat a verifikovat pomocí výsledků měření ve vhodně zvolených bodech na skutečné vodovodní síti. Základní čtyři fáze matematického modelování jsou:

- Sběr dat
- Výpočet vodovodní sítě

- Kalibrace a verifikace
- Analýza

Sběr dat je potřebný k sestavení modelu vodovodní sítě. Výpočtem vodovodní sítě se získají výsledky podávající informace o tlakových a průtokových poměrech v systému. Kalibrace je úprava vstupních dat tak, aby výstupní data z modelu co nejpřesněji vystihovala naměřené hodnoty na skutečné vodovodní síti. Verifikace se používá pro ověření vytvořeného modelu prostřednictvím nové skupiny naměřených dat na reálné vodovodní síti. Analýza je poslední fáze matematického modelování a také důvod jeho provádění. Slouží k předem stanovenému účelu, nejčastěji pro potřeby provozování a řízení stávajících vodovodních sítí. [4]

Ačkoli výsledky z takto provedené hydraulické analýzy vodovodní sítě jsou méně přesné než údaje z přímého měření, podávají informace o celé síti, což je podstatnou výhodou. [3]

Kalibrace

Kalibrace se provádí po prvotním odhadu vstupních parametrů. Většinou se jedná o hodnoty součinitele hydraulické drsnosti potrubí a hodnoty uzlových odběrů. Ověřuje se přesnost výsledků simulace vzhledem k naměřeným hodnotám na skutečné vodovodní síti. Vyhodnocení se provádí podle různých kritérií, většinou se používá absolutní nebo relativní odchylka kóty tlakové čáry. Přijatelná hodnota maximální odchylky sledované veličiny (kóta tlak. čáry, tlak, průtok) je v rozmezí 5-10 % v závislosti na typu řešené úlohy. Příčinou rozdílů mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami mohou být především: [4]

- Nesprávné hodnoty ve vstupních parametrech (součinitel hydraulické drsnosti, uzlový odběr)
- Nesprávný popis potrubí (dimenze, délka, ...)
- Nesprávná topologie sítě (potrubí propojená v nesprávných uzlech)
- Nesprávné okrajové podmínky (úroveň hladiny ve vodojemu, Q-H charakteristika čerpadla, chybné nastavení regulačních uzávěrů, ...)
- Nesprávné časové vazby (začátek a konec čerpání)
- Chyby v měření (chybné nastavení měřících zařízení, špatně odečtené veličiny, ...) [4]

Makro-kalibrace se provádí v případě, že odchylka některé ze sledovaných veličin překročí požadovanou přesnost. Tento stav nemůže být zapříčiněn pouze nesprávným odhadem hodnot součinitele hydraulické drsnosti nebo hodnot uzlového odběru. Je nutné provést pečlivou kontrolu všech vstupních dat a kritických míst. [4]

Mikro-kalibrací se nazývá doladění modelu. Provádí se v případě, že rozdíl vypočtených a naměřených hodnot je v požadovaných mezích. Mikro-kalibrace se provádí úpravou součinitele hydraulické drsnosti a uzlových odběrů. [4]

Verifikace

Verifikace se provádí pro ověření správnosti kalibrace. Zjišťuje se, zda jsou vstupní parametry (hodnoty součinitele hydraulické drsnosti a hodnoty uzlových odběrů) zadány správně. Postup je v podstatě shodný s postupem kalibrace. Podmínkou pro správnou verifikaci je použití těch naměřených hodnot, které nebyly použity pro kalibraci. Hodnoty tlaků a průtoků je třeba měřit v různých hodinách a za různých podmínek. Provádí se porovnávání vypočtených hodnot s novými naměřenými hodnotami průtoků a tlaků na vodovodní síti. Rozdíl se udává většinou v procentech. Při určování maximální přípustné odchylky je nutné vzít v potaz jak přesnost měřících zařízení, tak přesnost výpočtů hydraulických ztrát. [4]

Závěrem verifikace je buď stanovení, že model je úspěšně zkalibrován a verifikován, a tedy odpovídá realitě. Anebo, v případě výrazných odchylek mezi vypočtenými a naměřenými daty, zjištění, že je v modelu chyba, kterou je nutné najít a odstranit. [4]

2.1.1 Typy hydraulické analýzy

Statická analýza

Hydraulické parametry sítě se stanovují pouze pro jeden zatěžovací stav, při němž jsou stanovené odběry v síti pro daný časový úsek neměnné. Statická analýza v podstatě představuje jeden „snímek“ z provozu vodovodní sítě. Jedná se o ustálené proudění. [3][5]

Kvazi – dynamická analýza

Jedná se o posloupnost několika statických analýz, mezi nimiž je obvykle stejně velký časový krok libovolné délky (minuty, hodiny). Analýza probíhá většinou v delším časovém období (dny, týdny). Ke změně hodnot odběrů v síti a dalších fyzikálních parametrů (např. úroveň hladiny ve vodojemu) dochází pouze na rozhraní jednotlivých časových kroků. [3][5]

Dynamická

Je charakteristická velmi krátkým časovým krokem změny tlakových a průtokových poměrů (sekundy). Její nejčastější využití je pro hydraulickou analýzu vodního rázu (neustálené proudění). [3][5]

2.1.2 Vstupní data

Pro tvorbu modelu vodovodní sítě je třeba znát topologii řešené sítě, tedy údaje polohové, směrové, délkové a výškové. Je nutné získat informace o základních hydraulických parametrech jako je dimenze potrubí a trubní materiál, resp. hydraulická drsnost materiálu potrubí. Musíme zadat hodnoty odběrů a vtoků do sítě a vědět potřebné údaje o objektech ovlivňujících vodovodní síť jako jsou čerpadla, vodojemy, přerušovací komory, regulační ventily, uzávěry atd. [3]

Data potřebná ke kalibraci se získají přímým měřením na vodovodní síti. Jde o hodnoty průtoků a tlaků ve vybraných prvcích sítě a také o přesné hodnoty odběrů a vtoků do vodovodní sítě. [3]

2.1.3 Zadávání odběrů

Tvorba modelu vyžaduje značné zjednodušení. Aby byl model přehledný a zvládnutelný, není možné pro velký počet odběrných míst, čímž jsou myšleny především domovní přípojky, zadávat každý odběr jako samostatný uzel. To se provádí pouze u významných odběratelů jako je např. průmysl nebo větší objekty občanské a technické vybavenosti. Malé domácí odběry je nutné schematizovat. Odběry připadající na daný trubní úsek se rozdělují do jeho krajních uzlů. Zjednodušení se zpravidla provádí rozdělením celkové potřeby spotřebiště na jednotlivé úseky. K tomu je nejčastěji využívána jedna ze dvou metod: [3]

- Metoda redukováných délek
- Metoda dvou součinitelů

Metoda redukováných délek [3]

Podle hustoty a výšky zástavy se každému trubnímu úseku přiřazuje redukční součinitel C_l a pro každý úsek se vypočte redukovaná délka L_r :

$$L_r = C_l \cdot L \quad (2.1)$$

kde: L ... skutečná délka úseku [m]

L_r ... redukovaná délka úseku [m]

Součtem všech redukováných délek dílčích úseků se stanoví celková redukovaná délka sítě S_r :

$$S_r = \sum_{i=1}^m L_{ri} \quad (2.2)$$

kde: S_r ... celková redukovaná délka sítě [m]

Specifická potřeba dopravovaného média q_r se určí jako

$$q_r = \frac{Q_c}{S_r} \quad (2.3)$$

kde: q_r ... specifická potřeba [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

Q_c ... celková potřeba spotřebiště [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

Výsledný odběr i -tého úseku Q_i se stanoví jako

$$Q_i = q_r \cdot L_{ri} \quad (2.4)$$

kde: Q_i ... odběr i -tého úseku [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

Metoda dvou součinitelů [3]

Pokud jsou podklady o odběrech více podrobné, tedy pokud je možné každému odběrnému místu neboli přípojce přiřadit např. počet zásobovaných obyvatel, počet zásobovaných bytových jednotek, plochu zásobované zástavby atd., potom lze každému *i-tému* úseku přiřadit dva součinitele C_1 a C_2 .

Pro každý *i-tý* úsek určíme součin těchto dvou součinitelů P_i :

$$P_i = C_1 \cdot C_2 \quad (2.5)$$

kde: C_1 ... počet zásobovaných obyvatel, bytových jednotek, plocha zástavby

C_2 ... specifická potřeba na účelovou jednotku použitou v rámci C_1

Stanovíme součet všech těchto součinů S_r :

$$S_r = \sum_{i=1}^m P_i \quad (2.6)$$

Specifická potřeba dopravovaného média q_r se určí stejně jako v předchozí metodě, tedy dle rovnice 2.3 a výsledný odběr *i-tého* úseku se stanoví jako

$$Q_i = q_r \cdot P_i \quad (2.7)$$

kde: Q_i ... odběr *i-tého* úseku [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

q_r ... specifická potřeba [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

P_i ... součin součinitelů C_1 a C_2 pro *i-tý* úsek [-]

U statické hydraulické analýzy pak odběr *i-tého* úseku Q_i rovnoměrně rozdělíme do obou krajních uzlů uvažovaného úseku, tzn. že do každého krajového uzlu přiřadíme $0,5 \cdot Q_i$.

2.1.4 Základní podmínky hydraulické analýzy

Základem pro hydraulickou analýzu okružových tlakových sítí nestlačitelných látek jsou tři základní podmínky: uzlová, okružová a hydraulická. Tyto tři podmínky jsou také vyjádřením fyzikální zákonů. [3]

Uzlová podmínka [3]

Uzlová podmínka je vyjádřením zákona zachování hmoty. Říká, že součet všech přítoků do každého uzlu sítě se musí rovnat součtu odtoků z tohoto uzlu. (Neplatí pro závislé uzly, např. vodojem).

Odtokům a odběrům z uzlu se přiřazuje kladné znaménko, přítokům do uzlu se přiřazuje záporné znaménko, pak pro každý uzel sítě platí:

$$\sum Q_i = 0 \quad (2.8)$$

Okružová podmínka [3]

Okružová podmínka je vyjádřením zákona zachování energie. Říká, že součet všech tlakových ztrát v nezávislém okruhu sítě při zvolené okružové orientaci je nulový.

$$\sum h = 0 \quad (2.9)$$

Obvykle se okružová orientace volí kladná ve směru pohybu hodinových ručiček. Pokud je směr průtoku na daném úseku shodný se zvolenou okružovou orientací, přiřazuje se tlakové ztrátě na tomto úseku kladné znaménko, pokud je směr průtoku na daném úseku opačný než zvolená okružová orientace, přiřazuje se tlakové ztrátě na tomto úseku znaménko záporné.

Hydraulická podmínka [3]

Jde o stavovou rovnici, která určuje vztah mezi tlakovou ztrátou h a průtokem Q v trubním úseku.

Tento vztah můžeme matematicky popsat např. úpravou Darcy-Weisbachovy rovnice:

$$h = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.10)$$

kde: h ... tlaková ztráta [m]

λ ... součinitel ztrát třením [-]

L ... délka úseku [m]

d ... vnitřní průměr potrubí [m]

v ... průřezová rychlost proudění při průtoku Q [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

g ... gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

na vztah:

$$h = K \cdot Q^2 \quad (2.11)$$

$$K = 0,020678 \lambda \cdot \frac{L}{d^5} \quad (2.12)$$

kde: K ... odporový součinitel příslušného úseku

2.1.5 Epanet 2.0

Pro hydraulickou analýzu vodovodních sítí existuje v současné době celá řada výpočetních modelů. Asi světově nejrozšířenějším výpočetním modelem je Epanet, který byl vyvinutý agenturou U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency), na jejichž webových stránkách je od roku 2000 volně k dispozici. Epanet je open-source software, který tvoří výpočetní jádro velké skupiny softwarových prostředků jako např. WaterCAD, CYBERNET, MikeNet, H2Onet SiteFlow. Vedle Epanetu má velké zastoupení výpočetní model Kypipe,

kteřý je také hojně využíván po celém světě. Kypipe společně s Epanetem tvoří standard v hydraulickém posuzování vodovodních sítí. [6][3]

Základní charakteristika

Epanet 2.0 je softwarová aplikace, která umožňuje provádět statickou a kvazi-dynamickou hydraulickou analýzu newtonovských kapalin v tlakových trubních sítí. Také je schopná řešit kvalitativní analýzu vody v tlakovém trubním systému. Počítačový program Epanet je navržen pro mnoho různých druhů aplikací v analýze trubních rozvodů. Například je možné sestavit program odběru vzorků, analyzovat množství zbytkového chlóru, posoudit alternativní strategie řízení pro zlepšení kvality vody v celém systému, vytvořit hydraulickou analýzu sítě atp. [3]

Pracovní prostředí Epanetu umožňuje zadávat data a tvořit model v souřadnicovém systému X, Y. Je možné využít podkladní mapy nebo schémata. V aplikaci lze editovat data, provádět simulace a zobrazovat, vyhledávat a exportovat výsledky v různých formách, tedy jako barevné mapy, datové tabulky či grafy. [3]

Program Epanet předpokládá, že vodovodní distribuční systém je soubor úseků a uzlů. Uzly v Epanetu tvoří propojené křížení potrubí nebo konce trubních úseků, vodojemy a nádrže. Úseky tvoří potrubí, čerpadla a ventily. Velikost simulované sítě není nijak omezena. [6][7]

V jednotlivých uzlech je třeba zadat nadmořskou výšku a odběr vody. Do programu Epanet 2.0 se v rámci snižování odběrných míst a zjednodušení modelu zadává odběr do uzlů (viz kapitola 2.1.3 Zadávání odběrů). [7]

Nádrže v modelu mají neomezený objem a neměnnou hladinu, mohou představovat např. jezera, řeky, volné podzemní zdroje atp. [7]

Vodojem má v modelu danou kapacitu a objem zdržené vody se může s časem během simulace měnit. Vodojemu je nutné zadat nadmořskou výšku dna, průměr nádrže (nebo tvar, není-li válcový) a počáteční, maximální a minimální hladinu vody. [7]

Trubním úsekům se přiřazuje dimenze, délka a hydraulická drsnost materiálu. Je možné také změnit stav úseku z otevřeného na uzavřený. Hydraulická drsnost materiálu se zadává v závislosti na zvoleném vztahu pro výpočet tlakových ztrát třením po délce. Ten může být buď podle Hazen-Williamsovy rovnice (H-W), která je využívána zejména v USA nebo dle Darcy-Weisbacha (D-W) nejčastěji využívaného v Evropě nebo můžeme použít rovnici dle Chezy-Manninga, která je ovšem běžnější spíše pro proudění v otevřených korytech. V případě použití H-W vztahu nabývá koeficient hydraulické drsnosti maximální hodnoty 150, kdy je drsnost materiálu minimální. Se snižující se hodnotou koeficientu drsnost materiálu roste. Použije-li se vztah D-W hydraulická drsnost se zvyšuje se zvyšující se hodnotou koeficientu, který nabývá hodnot v řádech desetinných čísel až jednotek. Epanet také umožňuje zohlednit tlakové ztráty místní v armaturách a obloucích, které je možné k úseku přidat zadáním příslušného koeficientu. [7]

Čerpadla jsou v Epanetu úseky s nulovou délkou, kde je dopravovanému médiu dodávána energie, čímž se zvyšuje tlak tohoto média. Čerpadlu je třeba zadat jeho Q-H charakteristiku, kterou lze zadat do programu několika způsoby: jedním bodem, třemi body nebo více body. Dále je možné simulovat jak čerpadlo s konstantními otáčkami tak s proměnnými otáčkami. [7]

Ventily jsou v Epanetu úseky s nulovou délkou, které omezují tlak nebo průtok v určitém bodě sítě. Vstupní parametry ventilů jsou typ, dimenze a nastavení. Je možné takto simulovat např. zpětnou klapku, ventil pro regulaci výstupního tlaku, ventil pro regulaci průtoku, vytvoření konstantní tlakové ztráty atd. [7][3]

Pro takto nadefinovaný model je možné provést statickou hydraulickou analýzu. Pro potřeby kvazi-dynamické analýzy je nutné zadat časové křivky, což může být průběh odběrů během dne nebo časový průběh čerpání atp. [7]

Výsledkem výpočtu bude v jednotlivých časových krocích hydrodynamický tlak ve všech uzlech simulované sítě, průběh hladiny ve vodojemech, průtok a tlakové ztráty pro čerpadla. Pro jednotlivé trubní úseky se vypočte průtok a rychlost proudění. [7]

Epanet 2.0 je matematický model, který je řízený odběrem, jde o tzv. DDM – „Demand Driven Model“. Epanet 2.0 pro výpočet hydraulických veličin využívá gradientní metodu. [3]

Model řízený odběrem

Model řízený odběrem používá následující postup hydraulického výpočtu. Pro daný zatěžovací stav se nejprve určí uzlové odběry. Tím se zjistí, požadované celkové množství vody a průtoky v jednotlivých úsecích. Poté jsou počítány tlakové ztráty v každém úseku a zjistí se hydrodynamický tlak v jednotlivých uzlech. Předpokládá se, že stanovený odběr je vždy proveden v plném rozsahu bez ohledu na tlak v síti. Ačkoliv se jedná o zjednodušující předpoklad, který neodpovídá realitě, protože ve skutečnosti je míra odebraného množství na tlaku v síti závislá, při správném nastavení výpočtu jsou výsledky odpovídající. Při nesprávném nastavení výpočtu může v Epanetu z důvodu tohoto zjednodušení vycházet v uzlech záporný tlak, což signalizuje chybu v nastavení modelu. [3]

Gradientní metoda

Obecně jsou pro potřeby výpočtů hydraulické analýzy tlakových trubních systémů s nestlačitelnými médii používány metody iterační a gradientní. Program Epanet je založen na gradientní metodě výpočtu. [3]

Gradientní metoda hledá pomocí iterací řešení soustavy rovnic vytvořených z uzlové a hydraulické podmínky. Výpočtem jsou stanovovány tlaky v jednotlivých uzlech a průtoky ve všech úsecích. Nejprve se provede úvodní odhad průtoků v každém úseku. Tyto počáteční průtoky nemusí ještě nutně splňovat uzlovou podmínku. Výpočtem se hodnoty tlaků v jednotlivých uzlech a dále je řešena soustava nelineárních rovnic, jejímž výsledkem jsou nové průtoky v úsecích a opět se vypočtou tlaky ve všech uzlech sítě. Nastává iterační postup řešení, při kterém se hodnoty průtoků stále více zpřesňují. Snahou je splnit uzlovou podmínku. Výpočet končí v případě, že poměr součtu absolutních hodnot všech změn průtoků a součtu průtoků ve všech úsecích je menší než dostatečně malé číslo, v Epanetu je to hodnota 0,001. [3] Matematicky můžeme tento závěr řešení zapsat jako

$$\frac{\sum_{i=1}^n |Q'_i - Q_i|}{\sum_{i=1}^n Q_i} \leq 0,001 \quad (2.13)$$

kde: Q'_i ... průtok v i -tém úseku stanovený v předposledním kroku řešení [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

Q_i ... průtok v i -tém úseku stanovený v posledním kroku řešení [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] [8]

2.2 STÁVAJÍCÍ STAV VÝZKUMU V OBLASTI MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ VODOVODNÍCH SÍTÍ

Matematické modelování vodovodních sítí se stále vyvíjí. Je nutné ho vylepšovat především pro přesnější výsledky, které budou stále více odpovídat realitě. Výzkum se snaží o pokrok, který by vedl ke zlepšení provozu vodovodních distribučních systémů, vylepšuje stávající simulační programy a hledá nové výpočetní metody pro matematické modelování vodovodních sítí.

Z dostupné literatury vyplývá, že matematické modelování vodovodních sítí dospělo do fáze, kdy lze principálně definovat následující významné směry výzkumu: diskrétní modelování, stochastické modelování a kvantové modelování.

Nejvíce využívaný způsob matematického modelování vodovodních sítí je diskrétní modelování. Obecně je diskrétní modelování založeno na dynamickém přizpůsobení simulovaného modelu konkrétním událostem a procesům, které zasahují do simulovaného modelu v časové souslednosti. Tento způsob modelování je využit u všech modelů vodovodních sítí na bázi volně dostupného softwaru Epanet, jeho rozšíření a nástaveb nebo z něj vycházejících komerčních nástrojů a aplikací využívajících jeho výpočtové jádro. Například rozšířenou verzi programu Epanet použili Sunela a Puust (2015a), kteří se ve své případové studii zabývali hydraulickým a kvalitativním modelem systému zásobování pitné vody v reálném čase [9]. Nebo v jiném případě rozšířili program Epanet o model řídicího systému pro modelování přesného, dynamického chování vodovodního systému pracujícího pod komplexním nebo vysokoúrovňovým řídicím systémem [10]. Vyvinuli také nový způsob modelování paralelních čerpacích stanic, který umožňuje měnit typ řízení (tlak, průtok) a nastavit dynamickou změnu během simulace [10]. Vyloženě na rozšíření možností programu Epanet se zaměřili Iglesias-Rey a kol. (2017). Ve svém článku představují změnu původního programu Epanet zahrnující i novou nabídku v grafickém uživatelském rozhraní. Integrovali doplňkové nástroje, které umožňují například import datové sítě z CAD nebo GIS systémů, návrh vodovodních distribučních systémů pomocí genetických algoritmů, automatické přiřazení počáteční kvality vody jednotlivým uzlům sítě, skeletonizaci sítě nebo optimalizaci čerpacího plánu v síti za účelem dosažení minimálních nákladů na energii [11].

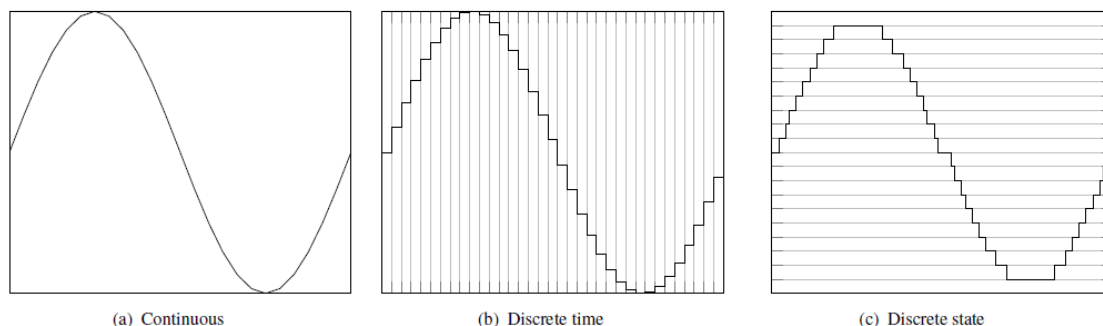
Další zavedený a využívaný přístup k matematickému modelování je stochastické modelování, které obvykle využívá metody Monte Carlo. Metoda Monte Carlo je statistický přístup zjištění pravděpodobnosti určitého jevu založený na mnohonásobné iteraci analýzy modelové situace. Pravděpodobnostní přístup modelování byl recentně využit například pro detekci chlorové

kontaminace ve vodovodní síti [12] nebo pro modelování spolehlivosti vodovodní sítě poškozené následkem zemětřesení [13].

Jeden ze zcela nových způsobů pro modelování a simulaci vodovodních distribučních systémů představují ve svém vědeckém článku Paluszczyszyn a kol. (2015). Jedná se o modelování a simulaci vodovodních distribučních systémů s využitím metod kvantového stavového systému (QSS metody). Tyto metody až doposud nebyly na vodovodní systémy aplikovány. Jde o přístup založený na stavové diskretizaci. [5]

Skutečná vodovodní síť představuje spojitý průběh hydraulických veličin proměnný v čase. Výpočet okruhových sítí však vyžaduje diskrétní charakter. Většina simulačních programů používá pro simulaci spojitého průběhu časovou diskretizaci, tedy rozdělení průběhu na časové kroky. Nejčastější výpočetní metody jsou: Hardy Cross, Newton-Raphson, gradientní metoda atd. Využitím těchto metod a jejich modifikací vznikly simulační prostředky např. Epanet, Finesse, H2Onet nebo WaterCAD. Ve všech těchto programech vede analýza okruhových sítí na řešení soustavy diferenciálních rovnic, které se vypočtou v pevných časových bodech. V případě simulace velkých složitých vodovodních sítí obsahujících stovky prvků, jako jsou regulační ventily, zpětné klapky nebo čerpadla řízená úrovní hladiny v nádrži mohou při tomto postupu nastat numerické potíže. (Spuštění čerpadla nemusí nastat v předem stanoveném časovém bodu, tedy událost, která se stala v průběhu časového intervalu v reálné síti může být přehlédnuta a je zavedena až v dalším kroku.) [5]

QSS metody diskretizují spojitý průběh hydraulických veličin na intervaly rozdělením hodnot proměnných veličin závislých na čase. Tento přístup simuluje pouze důležité body týkající se dynamiky systému, zatímco nečinnost systému (interval, který nevykazuje žádné změny stavu) se jednoduše přeskočí, na rozdíl od postupu využívající časovou diskretizaci, který simuluje i neaktivní periody. [5] Na obrázku 2-1 je schematicky znázorněn rozdíl mezi časovou a stavovou diskretizací.



Obr. 2-1 Časová a stavová diskretizace spojitého průběhu systému [5]

QSS metody jsou založeny na kvantizační funkci, která transformuje spojitě proměnné veličiny v kvantově diskrétní hodnoty těchto veličin. V závislosti na metodě kvantování může být průběh kvantizační funkce konstantní (QSS1), lineární (QSS2) nebo parabolický (QSS3). [5]

Paluszczyszyn a kol. (2015) posuzovali na případové studii přesnost výpočtu, počet výstupních bodů a dobu celkové simulace QSS metod (QSS1, QSS2 a QSS3) v porovnání s diferenciálním algebraickým systémem v programech OpenModelica a Epanet2. Výzkum ukázal, že QSS

metody, pokud jde o přesnost simulace, soutěží s tradičními simulačními prostředky. Pokud je zvolen rozumně krátký krok kvantování, potom algoritmus poskytuje výsledky, které jsou dostatečně v souladu s analytickým řešením. Avšak čím menší je kvantum, tím delší je doba simulace. To bylo obzvláště výrazné při výpočtu metodou QSS1. Metody QSS vyššího řádu, QSS2 a QSS3, při dosažení stejné přesnosti jako referenční simulace z programu OpenModelica čas simulace drasticky snížily. Z funkčního hlediska je použití QSS metod analogické s běžnými metodami založenými na časové diskretizaci. Bylo prokázáno, že QSS metody vyššího řádu jsou účinnější než tradiční řešení dělící spojitý průběh hydraulických veličin na časové úseky. Ovšem současný stav simulačních prostředků, které využívají QSS metody, ještě neumožňuje plné využití potenciálu, jaký QSS metody mají. Proto je zapotřebí simulační prostředky založené na QSS metodách dále rozvíjet, a to výslovně na modelování a simulaci vodovodních sítí. [5]

2.3 VÝZKUM PRO PRAKTICKÉ VYUŽITÍ SIMULAČNÍCH MODELŮ V BĚŽNÉM PROVOZU

Nejčastějším předmětem výzkumu pro zlepšení provozu vodovodních sítí je lokalizace a omezení míst úniků vody z potrubí. Úniky vody a jejich neznámé umístění totiž představují hlavní problém v celosvětovém provozu a řízení vodovodních distribučních systémů.

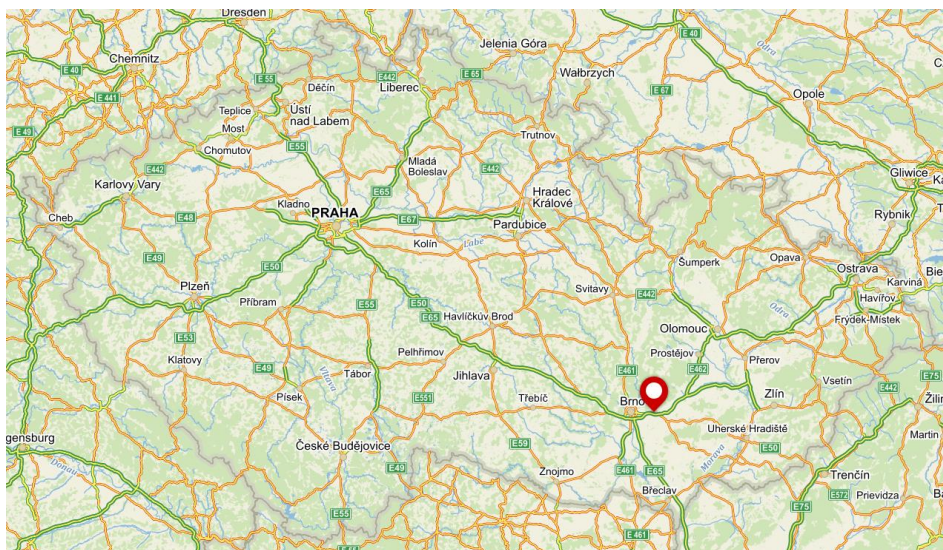
Touto problematikou se zabývali Mazzolani a kol. (2016). Podstatou jejich práce byla metodika odhadování úniků ve vodovodních sítích založená na analýze záznamů o přítoku do vodovodní distribuční sítě. Úniky vyhodnocuje na základě sezónních výkyvů spotřeby vody. Metodika zahrnuje vliv tlaku na úniky v závislosti na denních změnách spotřeby vody od odběratelů. Metodika byla testována na dvou syntetických případových studiích, které ověřily hlavní předpoklady metodiky. Ukazují, že postup je schopen za různých hydraulických podmínek potvrdit odhady intenzity úniku. Výsledky motivují pokračující výzkum použít tuto metodiku pro další aplikace na reálných vodovodních distribučních sítích. [14] Sophocleous a kol. (2015) se ve své práci snažili dospět k přesné lokalizaci míst úniků vody z vodovodní sítě. Nastínili slibné řešení složitěho problému současné kalibrace, která je příliš hrubá a způsobuje systémové a datové odchylky, které mají vliv na simulovaný tlak v modelu. Jde o neznámý stav nebo nastavení ventilů, neznámé údaje o potrubí, zejména hodnoty hydraulické drsnosti materiálu, neznámé propojené křížení potrubí a místa úniků vody. Kombinace terénního měření a postupné optimalizace analýz by mohla vyřešit tento problém. Na případové studii bylo prokázáno, že zařazení terénních testů plánovaného vypouštění hydrantů a souběžného taktického ovládání ventilů pomůže odhalit neznámý stav ventilů, ale také povede ke zpřesnění hydraulické drsnosti potrubí, a je základním krokem k přesné lokalizaci úniků. [15]

Výzkum se také zaměřuje na kvalitativní analýzu. Například velký význam při řízení koncentrací dezinfekčních prostředků má modelování zbytkového chloru. Tímto se ve své práci zabývali Monteiro a kol. (2014). Zaměřili se na složitější přístup kinetiky rozpadu chlórů, jmenovitě na paralelní dvoureakční model rozpadu druhého řádu (2R model). Bylo zjištěno, že poskytuje lepší přesnost pro simulaci hromadného rozkladu chloru v laboratorních testech než model rozpadu prvního řádu, který se v současnosti používá. K simulaci byl použit program Epanet MSX (Multiple Species Enhancement) a webová aplikace 3D Epanet Java. [16]

3 ŘEŠENÁ LOKALITA – OBEC TVAROŽNÁ

3.1 POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

Obec Tvarožná leží v Jihomoravském kraji ve východní části okresu Brno-venkov asi 10 km od města Brna. Nachází se u sjezdu z dálnice D1 Brno – Olomouc na 207 km u motorestu Rohlenka. Poloha obce je znázorněna na obrázku 3-1 a 3-2. Rozloha katastru obce je 882,87 ha, přičemž zastavěno je zhruba 10 %. Zastavěná část obce se nachází v nadmořské výšce 250 až 270 m n. m. V obci žije 1261 obyvatel (údaj platný k 31.12.2016) [17]. Organizačně je Tvarožná samostatnou obcí s vlastním obecním úřadem. Obcí s rozšířenou působností je město Šlapanice, stavební úřad využívá Tvarožná v Pozořicích. [18]



Obr. 3-1 Poloha obce Tvarožná na území České republiky [19]



Obr. 3-2 Poloha obce Tvarožná v okrese Brno-venkov [19]

3.1.1 Charakter zástavby

Celkový charakter obce Tvarožná můžeme považovat za vesnický. V obci se nachází něco přes 400 rodinných domů, které mají většinou jedno až dvě nadzemní podlaží. Jen na konci ulice Hlinky na severu obce stojí dva bytové domy se dvěma nadzemními podlažími. Nejstarší částí obce je návěs, která je ve svém středu bohatě osázena zelení. Podél cest vybíhajících z obce vznikly postupnou řadovou výstavbou další ulice. V posledních letech byla vystavěna nová řadová zástavba v oblasti bývalé cihelny. Od východu na západ protéká středem obce Tvaroženský potok. V obci jsou dva obchody s potravinami a dva hostince. Dále je v obci zřízena základní škola pro první stupeň a mateřská škola se školní jídelnou. Přímo v obci se nenacházejí žádné velkoodběratelé vody.

3.2 ZPŮSOB ZÁSOBOVÁNÍ PITNOU VODOU

Obec je zásobována pitnou vodou ze skupinového vodovodu Říčky, jehož zdrojem vody jsou vodní zdroje Říčky a Mokrá. Zásobovací řad, přes který jsou zásobovány obce Sívce, Pozořice, Kovalovice, Viničné Šumice, Tvarožná a Jiříkovice, je z TLT dimenze DN 200. Je veden z vodojemu Mokrá, který je v nadmořské výšce 361 m a jeho celková kapacita je 2 000 m³. Ve vodoměrné šachtě odbočuje z hlavního zásobovacího řadu v km 1,3 samostatná větev, která přivádí vodu do vodojemu Tvarožná 150 m³ (hlad. 282,0 / 279,0 m n. m.). Toto potrubí je z TLT dimenze DN 200 (Normal PUR) a jeho celková délka je 1392 m. (sdělení Ing. P. Hlaváč, SVK Šlapanicko) [20]

Významní spotřebitelé ležící na katastru obce (v jihozápadní části), jako je ZD Bonagro, motorek Rohlenka a ČS OMV, jsou zásobeni ze skupinového vodovodu Říčky přes vlastní vodojem na kopci Santon 90 m³ a dále vodu doplňují z vlastních zdrojů (sdělení Ing. P. Buchta, starosta obce Tvarožná). Tato samostatná větev není v této práci řešena.

3.2.1 Skupinový vodovod

Skupinový vodovod byl kompletně zrekonstruován v roce 2015. Je z tvárné litiny DN 200. Ze SV je mezi Mokrou a Tvarožnou napojen odbočný řad zásobující obce Sívce, Pozořice, Kovalovice a Viničné Šumice. Za Tvarožnou skupinový vodovod pokračuje nad Jiříkovice, kde je v současnosti ukončen v armaturním objektu, z kterého je od roku 2015 napojena obec Jiříkovice. Výhledově cca do 3 let by měly být na skupinový vodovod napojeny obce Blažovice, Ponětovice, Prace a Kobylnice. (sdělení Ing. P. Hlaváč, SVK Šlapanicko)

3.2.2 Vodojem Mokrá

Z vodojemu Mokrá je voda gravitačním přívodním řadem distribuována do skupinového vodovodu. Vodojem leží severovýchodně od obce Mokrá. V letech 2013–2015 prošel vodojem kompletní rekonstrukcí. Jedná se o zemní vodojem s jednou dvoupodlažní armaturní komorou a se dvěma akumulacími nádržemi o objemu vody 2×1 000 m³. AN mají tvar pravidelného osmiúhelníku. Dno nádrží je umístěno v nadmořské výšce 360,85 m n. m. Kóta přelivu je 365,6 m n. m. Kóta osy odběrného potrubí je ve výšce 360,53 m n. m. Výška vody v nádržích je 5 m. [20]

Do vodojemu je voda přiváděna z vodního zdroje Říčky gravitačně z přerušovacího VDJ Myslivna a z vodního zdroje Mokrá, pomocí výtlačného potrubí. Prítok vody z VZ Mokrá je zatím mimo provoz, se zprovozněním se počítá v další etapě. [20]

Ve vodojemu se voda upravuje chlorací. Pravidelně je ve vodojemu prováděn odběr vzorků vody pro rozbor vody, jak stanovuje Vyhláška MZ č. 252/2004 Sb. [20] Na obrázku 3-3 je zachycena část trubního vstrojení ve VDJ Mokrá.



Obr. 3-3 Vodojem Mokrá - trubní vstrojení

3.3 ZDROJ VODY

Zdrojem vody pro skupinový vodovod Říčky jsou podzemní vrty Říčky a Mokrá (sdělení Ing. P. Hlaváč, SVK Šlapanicko). Vodní zdroj Říčky zahrnuje zdroj Říčky I a zdroj Říčky II. Součástí je také čerpací stanice s akumulací 15 m³. Nachází se v CHKO Moravský kras, v údolí Říčky. [20]

Zdroj Říčky I tvoří tři jímací vrty V2, V2a a HV 301, které jsou umístěny v jednom oploceném území o ploše 990 m² na levém břehu Říčky nedaleko Svobodova mlýna. Voda ze všech těchto tří vrtů je čerpána ponornými čerpadly pomocí výtlačného řadu Říčky I do ČS Říčky, odkud je dále distribuována. Výtlačný řad Říčky I je proveden z PE d225 (Elmoplast) a jeho celková délka je 756 m. Jímací vrt V2 má vydatnost 7,5 l/s. Vrt je hluboký 452,2 m. Průměr ocelové zárubnice se s hloubkou snižuje. Do 4,6 m je průměr zárubnice 216 mm, od 4,6 m do 10,3 m je průměr 191 mm, od 10,3 m do 117,0 m je průměr 171 mm, dále vrt pokračuje bez vstrojení. Ve vrtu je v hloubce 48 m osazeno ponorné vícestupňové čerpadlo Grundfos SP, typ SP25-15, Q=5-8,3 l/s, H=122-77 m, 11 kW, 400 V, 50 Hz. Šachta nad vrtem je provedena z betonových skruží o průměru 1500 mm a je uzavřena betonovým prefabrikovaným poklopem, který je opatřen obdélníkovým prostupem o rozměrech 700 × 1300 mm. Jímací vrt V2a má vydatnost 7,5 l/s. Hloubka vrtu je 260 m, v 70 m je zborcen. Průměr zárubnice je 380 mm. Ve 42 m je

osazeno ponorné vícestupňové čerpadlo stejného typu a provozních parametrů jako ve vrtu V2. Šachta nad vrtem řešena stejně jako u vrtu V2. Jímací vrt HV 301 je hluboký 233 m. Jeho vydatnost je 8 l/s. Průměr zárubnice je do 70 m 219 mm, dále 140 mm. Vrt je vybaven ponorným 8 - stupňovým čerpadlem Grundfos SP 30-8, $Q=9,2$ l/s, $H=52$ m, 7,5 kW. Čerpadlo je osazené ve 45 m. Šachta je provedena z monolitického železobetonu C30/37. Z vnější strany je nadzemní část stěn obložena kamenným obkladem. Přístup do šachty je umožněn otvorem 700×900 mm, který je opatřený zatepleným uzamykatelným poklopem. Všechny vrty jsou v šachtách vybaveny automatickým od/zavzdušňovacím ventilem, ručním uzávěrem, zpětnou klapkou a kohoutem pro odběr vzorků. Ve všech vrtech je spínání čerpadel řízeno hladinou v akumulaci ČS Říčky a blokováno minimální hladinou ve vrtech. [20]

Zdroj Říčky II je tvořen dvojicí vrtů HV 107 a HV 201. Jímací vrt HV 107 je situován na louce u Horního mlýna. Vydatnost vrtu je 5,2 l/s. Vrt je opatřen podzemní monolitickou šachtou s rozměry 3000×2400 mm. Dno a stěny šachty jsou provedeny z prostého betonu. Strop je zhotoven z prefabrikátů se dvěma otvory pro sestup a montáž. Jímací vrt HV 201 se nachází v těsné blízkosti ČS, jeho vydatnost je 2,3 l/s. Šachta nad zhlavím vrtu je řešena obdobným způsobem jako u vrtu HV 107. [20]

Vodní zdroj Mokrý je umístěn ve středu staré části obce Mokrý. Součástí zdroje je studna a čerpací stanice. Studna je provedena ze skruží o průměru 1,5 m a je hluboká 7 m. Vydatnost zdroje je 7 l/s. ČS je přízemní budova o rozměrech $7,5 \times 4,5$ m. Základy jsou z prostého betonu, stěny jsou z cihel a zastřešení je provedeno z prefabrikátů. Součástí ČS je strojovna, chlorovna a předsíň. Odvodnění je zaústěné do kanalizace. [20]

Voda z vodního zdroje Mokrý bude výhledově přivedena do VDJ Mokrý, výtlačné potrubí je zhotoveno, ale zatím není zprovozněno. Voda v rozvodné síti obce Tvarožná proto v současné době pochází pouze z vodních zdrojů v lokalitě Říčky. [20]

3.4 ÚPRAVA VODY

Voda z vodních zdrojů splňuje požadavky na jakost pitné vody stanovené v příloze č. 1 vyhlášky MZ č. 252/2004 Sb., proto je voda upravována pouze dezinfekcí v nově zbudovaném vodojemu Mokrý. Jako dezinfekční činidlo je používán chlornan sodný. [20] Na obrázku 3-4 je vidět nádoba se zásobou dezinfekčního činidla.



Obr. 3-4 Dezinfekce vody ve vodojemu Mokrá

3.5 ROZVODNÁ VODOVODNÍ SÍŤ OBCE

Do rozvodné vodovodní sítě obce Tvarožná přitéká voda z jediného zásobovacího vodojemu obce Tvarožná, který se nachází na jihu obce, v nejvyšším místě u hřbitova. Objem tohoto vodojemu je 150 m³ a kóty hladin jsou 282,0 / 279,0 m n. m. [20]

Před napojením na SV Říčky bylo využíváno jako vodní zdroj jímací území Tvarožná na východním okraji obce. Vydatnost je 1,5 l/s. Voda z tohoto zdroje ale neodpovídá požadavkům na kvalitu pitné vody, které stanovuje vyhláška MZ č. 252/2004 Sb. Proto je zdroj v současné době mimo provoz a vodu z tohoto prameniště je možné odebírat jen v nouzových případech. [20]

Rozvodná vodovodní síť obce je rozdělena do třech tlakových pásem. V rozvodné síti jsou umístěny dvě automatické tlakové stanice. Jedna je v budově základní školy a navyšuje tlak ve 2.TP pro odběratele u školy a v části Krhon. Druhá ATS je umístěna v polovině ulice Hlinky a navyšuje tlakové poměry ve 3.TP pro zástavbu V Cihelně a pro odběratele v horní polovině ulice Hlinky. Ostatní části obce jsou zásobovány z vodojemu gravitačně (1.TP). Jako materiál

na vodovodní síť v obci byla většinou použita šedá litina a PVC, novější řady jsou z PE. Dimenze potrubí v obci jsou DN 50, DN 80, DN 100 a DN 150. Rozvodná síť obce byla budována postupně, nejstarší části pocházejí z roku 1975, další části potrubí byly položeny v roce 1991 a další v roce 1998. Nejnovější části rozvodné sítě pocházejí z let 2008 a 2009. Síť je z velké části zokruhována, což umožňuje provádět zásobování z různých směrů. (sdělení Ing. P. Hlaváč, SVK Šlapanicko) [20] V příloze 1 – Přehledná situace vodovodní sítě obce Tvarožná je vyznačeno DN, materiál a rok položení jednotlivých úseků sítě. Podkladová mapa je doplněna o místní názvy ulic. Na obrázku 3-5 jsou znázorněny materiály a dimenze rozvodné vodovodní sítě obce.



Obr. 3-5 Materiály a profily potrubí rozvodné vodovodní sítě [21] (sdělení Ing. P. Hlaváč, SVK Šlapanicko)

Celkem je na síti umístěno 55 hydrantů, z toho je jeden nadzemní, ostatní jsou podzemní. Pro požární účely slouží 8 hydrantů, zmíněný nadzemní hydrant a dalších 7 podzemních hydrantů označených cedulkou (sdělení Ing. P. Buchta, starosta obce Tvarožná). Bližší popis je uveden v tabulce 3-1 a poloha požárních hydrantů je patrná z obrázku 3-6. Umístění všech hydrantů je znázorněno na hydrantové mapě v příloze č. 1.

Tab. 3-1 Seznam požárních hydrantů obce Tvarožná (sdělení Ing. P. Buchta, starosta obce Tvarožná)

Hydrant	Umístění	Typ	Poloha	Světlost DN potrubí	Světlost DN hydrantu	Označení	Pozn.
H2	u čp. 82	Nadzemní bez šoupěte – Hawle 2xB	travnatá plocha	150 TL	80	Ne Hydrant je viditelný	
H10	u čp. 223	Podzemní bez šoupěte – Krammer	travnatá plocha	100 PVC	80	Ano Sloupek s cedulkou	
H15	u čp. 1	Podzemní bez šoupěte – JMA VAG Supra	asfaltová vozovka	150 PVC	80	Ano Sloupek s cedulkou	
H19	u čp. 326	Podzemní bez šoupěte – Krammer	v chodníku	80 PVC	80	Ano Sloupek s cedulkou	Koncový hydrant
H21	u čp. 163	Podzemní bez šoupěte – Krammer	travnatá plocha	150 PVC	80	Ano Sloupek s cedulkou	
H30	u čp. 332	Podzemní bez šoupěte – Krammer	travnatá plocha	150 PVC	80	Ano Sloupek s cedulkou	
H37	u čp. 99	Podzemní se šoupětem	asfaltová vozovka	100 PVC	80	Ano Cedulka na zdi	
H40	u čp. 364	Podzemní se šoupětem - Krammer	dlážděná plocha	100 LPE	80	Ano Cedulka na zdi	Koncový hydrant



Obr. 3-6 Umístění požárních hydrantů [21] (sdělení Ing. P. Buchta, starosta obce Tvarožná)

V současnosti je k veřejnému vodovodu v obci připojeno asi 90 % obyvatelstva. Spotřeba vody je poměrně nízká, protože velká část obyvatel využívá pro nepitné účely vlastní zdroj (studnu).

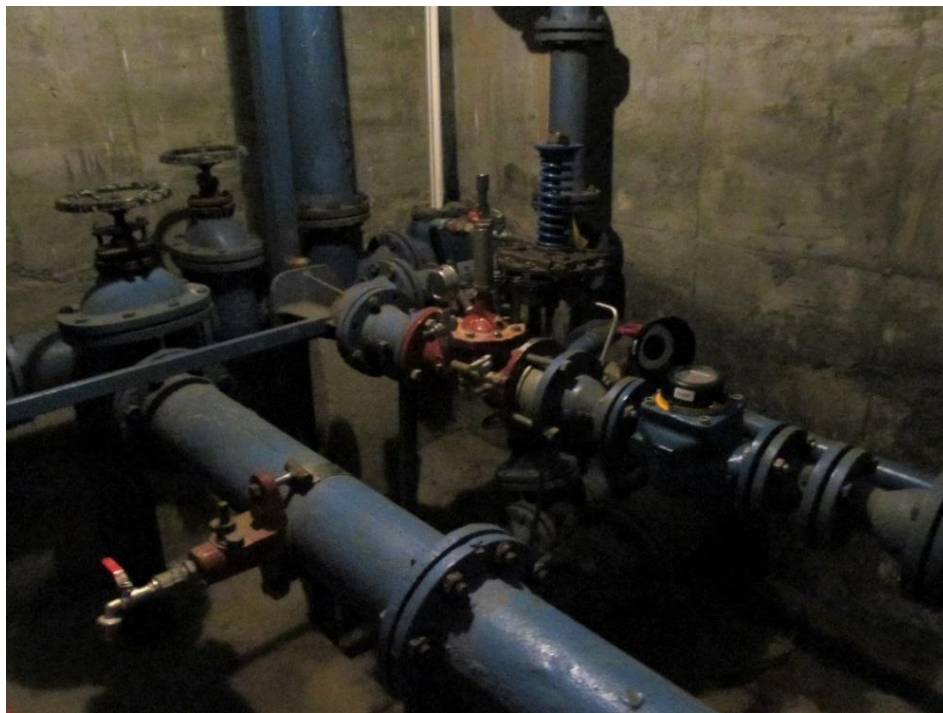
Zmíněné bytové domy v ulici Hlinky v severní části obce nejsou na veřejný vodovod napojeny. Studna pro tyto bytovky je na severovýchodním konci obce u hlavní silnice směrem na obec Sívce. Voda z tohoto zdroje je do bytových domů dopravována vlastním potrubím délky cca 600 m. (sdělení Ing. P. Buchta, starosta obce Tvarožná)

3.5.1 Vodojem Tvarožná

Vodojem Tvarožná je umístěn na jižním okraji obce poblíž hřbitova. Jedná se o zemní vodojem. Objekt se skládá ze vstupní a armaturní komory a jedné akumulční nádrže. Vstupní a armaturní komora jsou zhotoveny v typizovaném provedení s půdorysnými rozměry $3,6 \times 3,3$ m. Podzemní část je z betonu, nadzemní je postavena z cihel. Akumulční nádrž je kruhového půdorysu o průměru 7,6 m. Dno nádrže je železobetonové, stěny a strop jsou z prefabrikátů. Objem akumulace je 150 m^3 . Minimální hladina je ve výšce 279,00 m n. m. a maximální hladina má kótu 282,00 m n. m. Vstup do akumulace z armaturní komory je zajištěn dveřmi nad maximální hladinou. Akumulční nádrž je zasypána zeminou. Celý objekt je chráněn drátěným oplocením. [20]

Do vodojemu je voda přiváděna ze skupinového vodovodu (SV) odbočným řadem z TLT dimenze DN 200 (Normal PUR) dlouhým 1392 m [20]. Do vodojemu také ústí výtlačné potrubí

z vodního zdroje Tvarožná, který je v současné době mimo provoz. Vodoměr je ve vodojemu umístěn pouze na přítoku ze SV. Vodojem je ve špatném technickém stavu, potrubí v armaturní komoře značně podléhá korozi. V současné době je objekt v rekonstrukci. (sdělení p. Železný, VAS, a.s.). Na obrázku 3-7 je zachycena část trubního vstrojení ve vodojemu a na obrázku 3-8 je vidět vodoměr na přítoku do akumulční nádrže.



Obr. 3-7 Vodojem Tvarožná - trubní vstrojení



Obr. 3-8 Vodoměr na přítoku ve vodojemu Tvarožná

3.6 MAJETKOPRÁVNÍ VZTAHY

Rozvodná vodovodní síť obce Tvarožná je vložena do vlastnictví SVK Šlapanicko, adresa: Masarykovo nám. 100, 664 51 Šlapanice, IČ: 49458833, jehož je obec Tvarožná členem.

Skupinový vodovod Říčky je vlastním majetkem SVK Šlapanicko.

Provozovatelem je VAS, a.s., divize Brno-venkov, adresa: Soběšická 151, 638 01 Brno, IČ: 49455842.

3.7 JAKOST VODY VE SPOTŘEBIŠTI

Provozovatel vodovodu se při určování jakosti pitné vody řídí vyhláškou MZ č. 252/2004 Sb., kde jsou v příloze č. 1 uvedeny mikrobiologické, biologické, fyzikální, chemické a organoleptické ukazatele pitné vody a jejich hygienické limity. V příloze č. 4 k této vyhlášce je určena minimální roční četnost odběrů a rozsah rozborů vzorků pitné vody. [22]

V případě skupinového vodovodu Říčky se minimální roční počet odběrů vzorků stanovuje pro celý skupinový vodovod. Ten zásobuje okolo 8 000 obyvatel a spotřeba pitné vody je cca 900 m³/den. Což znamená 4 krácené rozborů + 3 krácené rozborů za 1000 m³/den (včetně nedokončených) z celkového objemu (900 m³/d), pro úplné rozborů je základ 1 + 1 za každých 3 300 m³/den (včetně nedokončených) z celkového objemu (900 m³/d) [22]. Sečteno pro SV Říčky vychází 7 krácených a 2 úplné rozborů pitné vody za rok (sdělení Ing. M. Doležalová, VAS, a.s.). V obci Tvarožná se krácený rozbor provádí na jednom stálém místě jednou za rok a rozbor úplný vychází na Tvarožnou zhruba jednou za tři roky. (sdělení Ing. P. Hlaváč, SVK Šlapanicko). V tabulce 3-3 jsou uvedeny výsledky krácených rozborů v obci Tvarožná za posledních pět let.

Průměrná tvrdost vody (koncentrace vápníku a hořčíku) ve SV Říčky je 4,3 mmol/l [23]. Podle stupnice tvrdosti vod se jedná o značně tvrdou vodu (viz tabulka 3-2). Dle vyhlášky MZ č. 252/2004 Sb. ve znění pozdějších předpisů je doporučená hodnota koncentrace vápníku a hořčíku (tvrdost vody) v rozmezí 2,0 – 3,5 mmol/l. [22]

Tab. 3-2 Stupnice tvrdosti vod [25]

Stupnice tvrdosti vod:	
Velmi měkká	0-0,7 mmol/l
Měkká	0,7-1,4 mmol/l
Středně tvrdá	1,4-2,1 mmol/l
Tvrdá	2,1-3,2 mmol/l
Značně tvrdá	3,2-5,3 mmol/l
Velmi tvrdá	>5,3 mmol/l

Tab. 3-3 Krácené rozborý vody z rozvodné sítě v obci Tvarožná (sdělení Ing. M. Doležalová, VAS, a.s.)

Odběrné místo:			Tvarožná – č. 180 výrobní cukroví - dřež				
Datum odběru:			2013	2014	2015	2016	2017
Zkouška	Jednotka	Limit					
Escherichia coli	KTJ/100ml	0 (NMH)	0	0	0	0	0
Koliformní bakterie	KTJ/100ml	0 (MH)	0	0	0	0	0
Počty kolonií při 36 °C	KTJ/ml	20 (MH)	3	0	0	1	1
Počty kolonií při 22 °C	KTJ/ml	200 (MH)	0	0	0	0	0
Elektrická konduktivita	mS/m	125 (MH)	81,6	81,6	67,4	83,8	79,7
Chlor volný	mg/l	0,30 (MH)	0,02	0,19	0,08	0,02	0,04
Teplota	°C	8 – 12 (DH)	15,7	11,0	7,9	9,5	5,2
Pach	stupeň	2 (MH)	0	0	0	0	0
Chuť	stupeň	2 (MH)	0	0	0	0	0
pH	-	6,5 – 9,5 (MH)	6,8	7,4	7,3	7,2	7,1
Barva	mg/l Pt	20 (MH)	<2	<2	<2	<2	<3
Zákal	ZFt	5 (MH)	0,70	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Dusitany	mg/l	0,50 (NMH)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,05
Amonné ionty	mg/l	0,50 (MH)	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,02
Dusičnany	mg/l	50,0 (NMH)	9,11	10,2	4,79	7,38	11,6
CHSK _{Mn}	mg/l	3,0 (MH)	0,49	0,65	1,14	0,7	0,5
Železo	mg/l	0,20 (MH)	0,010	0,005	0,007	0,004	0,006

4 MĚRNÁ KAMPAŇ

V obci Tvarožná bylo provedeno v termínu 9. – 11. 12. 2016 měření tlaků (pátek až neděle cca 55 hodin). Tlak byl měřen ve všech třech tlakových pásmech v obci. V každém pásmu bylo osazeno jedno tlakové čidlo do podzemního hydrantu. V 1. TP se měřilo v ulici Za Humny (H32), v 2. TP v části Krhon (H48) a ve 3. TP v lokalitě Cihelna (H53). Přibližná lokalita osazených hydrantů je znázorněna na obrázku 4-1. Byla použita tlaková čidla s rozsahem 0-16 bar: dvakrát Drulo II a jedenkrát Sensus COSMOS 2U Datalogger (viz obr. 4-2). Přesnost čidel je 1 cm v. sl. Čidla měřila tlak po 15 sekundách. Šlo tedy o velmi přesné měření.



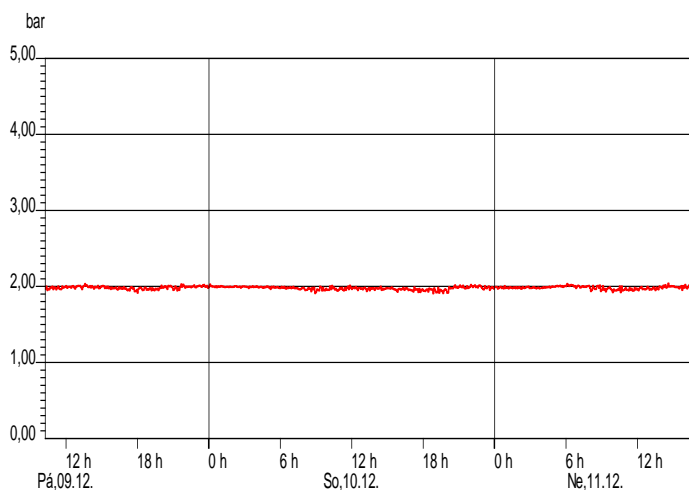
Obr. 4-1 Místa měření [21]



Obr. 4-2 Osazení tlakových čidel: Sensus COSMOS 2U Datalogger (vlevo) a Drulo II (vpravo)

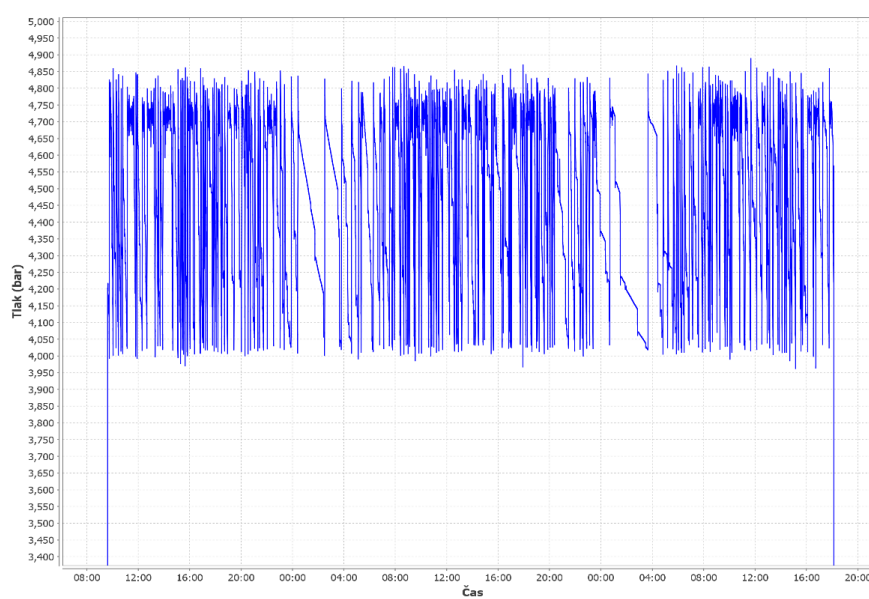
4.1 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

V prvním tlakovém pásmu, kde voda proudí gravitačně, bylo použito čidlo Sensus COSMOS 2U Dataloger, číslo přístroje 2. Čidlo bylo osazeno do podzemního hydrantu H32 v ulici Za Humny poblíž domu č. p. 340. Nadmořská výška měřidla byla 260,40 m n. m. Z výsledků měření byla stanovena průměrná hodnota tlaku 1,97 bar. Minimální hodnota tlaku byla 1,90 bar a nastala 10. 12. v 18:50. Maximální tlak byl 2,03 bar a byl naměřen 11. 12. ve 14:35. Na obrázku 4-3 je znázorněn průběh tlaků během měření v 1. TP.



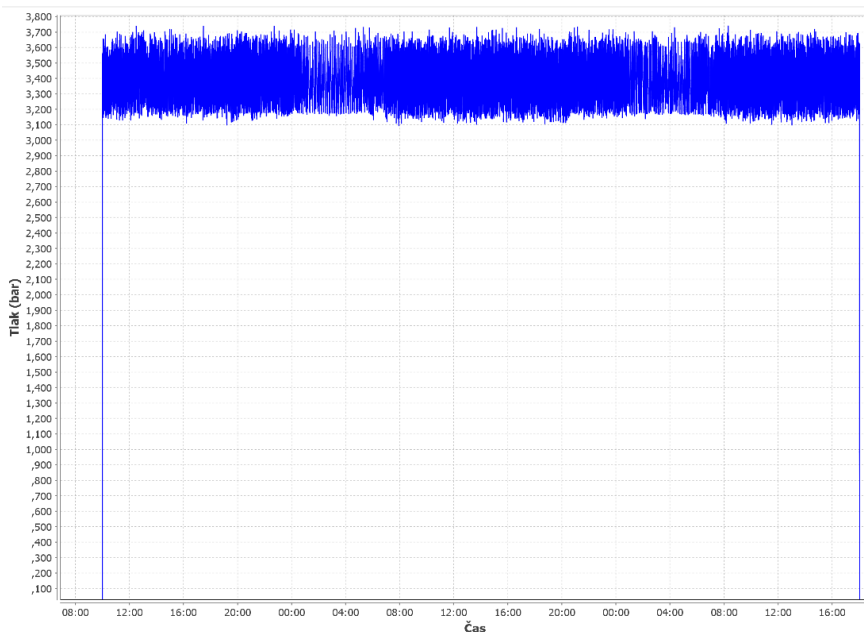
Obr. 4-3 Průběh naměřených tlaků v 1.TP (lokality Za Humny)

V druhém tlakovém pásmu za ATS umístěné v budově školy, bylo použito čidlo Drulo II, číslo přístroje 761. Čidlo bylo umístěno do podzemního hydrantu H53 u domu č. p. 104 v části Krhon. Nadmořská výška přístroje byla 264,00 m n. m. Průměrná hodnota naměřených tlaků byla 4,39 bar. 10. 12. v 17:56 klesl tlak na naměřené minimum 3,97 bar. Maximální hodnota 4,86 bar byla naměřena 9. 12. v 15:40. Na obrázku 4-4 je vidět průběh tlaků během měření v 2. TP.



Obr. 4-4 Průběh naměřených tlaků v 2.TP (lokality Krhon)

Ve třetím tlakovém pásmu za ATS v ulici Hlinky bylo osazeno čidlo Drulo II číslo 553 do podzemního hydrantu H48 poblíž domu č.p. 390 v nové zástavbě v lokalitě Cihelna. Nadmořská výška čidla byla 257,00 m n. m. Průměr naměřených tlaků byl 3,45 bar. Minimální hodnota 3,11 bar byla zaznamenána 10. 12. v 8:08. Maximální tlak 3,74 bar byl dosažen 9. 12. ve 12:30. Na obrázku 4-5 je vidět průběh tlaků během měření v 3. TP.



Obr. 4-5 Průběh naměřených tlaků v 3. TP (lokalita Cihelna)

Pro rekapitulaci jsou výsledky měření tlaků zaznamenány do přehledné tabulky 4-1.

Tab. 4-1 Výsledky měření tlaků ve vodovodní síti

Lokalita	Minimum [bar]	Průměr [bar]	Maximum [bar]
1 TP – Za Humny (gravitační)	1,90	1,97	2,03
2. TP – Krhon (ATS škola)	3,97	4,39	4,86
3. TP – Cihelna (ATS Cihelna)	3,11	3,45	3,74

Výsledky měření ukazují, že v částech vodovodní sítě za automatickými tlakovými stanicemi je tlak vody optimální, průměrná hodnota se pohybuje kolem 3,5 bar nebo 4,4 bar. V gravitačním pásmu se tlak pohybuje nad minimální hodnotou 0,15 MPa (tj. 1,5 bar), kterou stanovuje vyhláška č. 428/2001 Sb, pro zástavbu do dvou nadzemních podlaží. To provozně postačuje a z hlediska ztrát vody, je tento nízký tlak pro provoz výhodný. Tlaky zaznamenané během měření odpovídají hodnotám uvedených ve vyhlášce MZe č. 428/2001 Sb. Při měření v žádném případě neklesl tlak pod hodnotu minimálního tlaku 0,15 MPa (tj. 1,5 bar) ani v žádném případě nepřekročil hodnotu maximálního tlaku 0,6 MPa (tj. 6,0 bar) stanoveného vyhláškou [24]. Během měření nebyly zaznamenány žádné hydraulické rázy.

5 HYDRAULICKÁ ANALÝZA

5.1 VSTUPNÍ DATA A STAVBA MODELU

Matematickému modelování vodovodních sítí nutně předchází příprava vstupních dat. Každý výpočetní model vyžaduje vstupní data o uzlech, trubních úsecích, vodojemech, čerpadlech a dalších objektech, které se na síti vyskytují.

Podklady pro stavbu modelu:

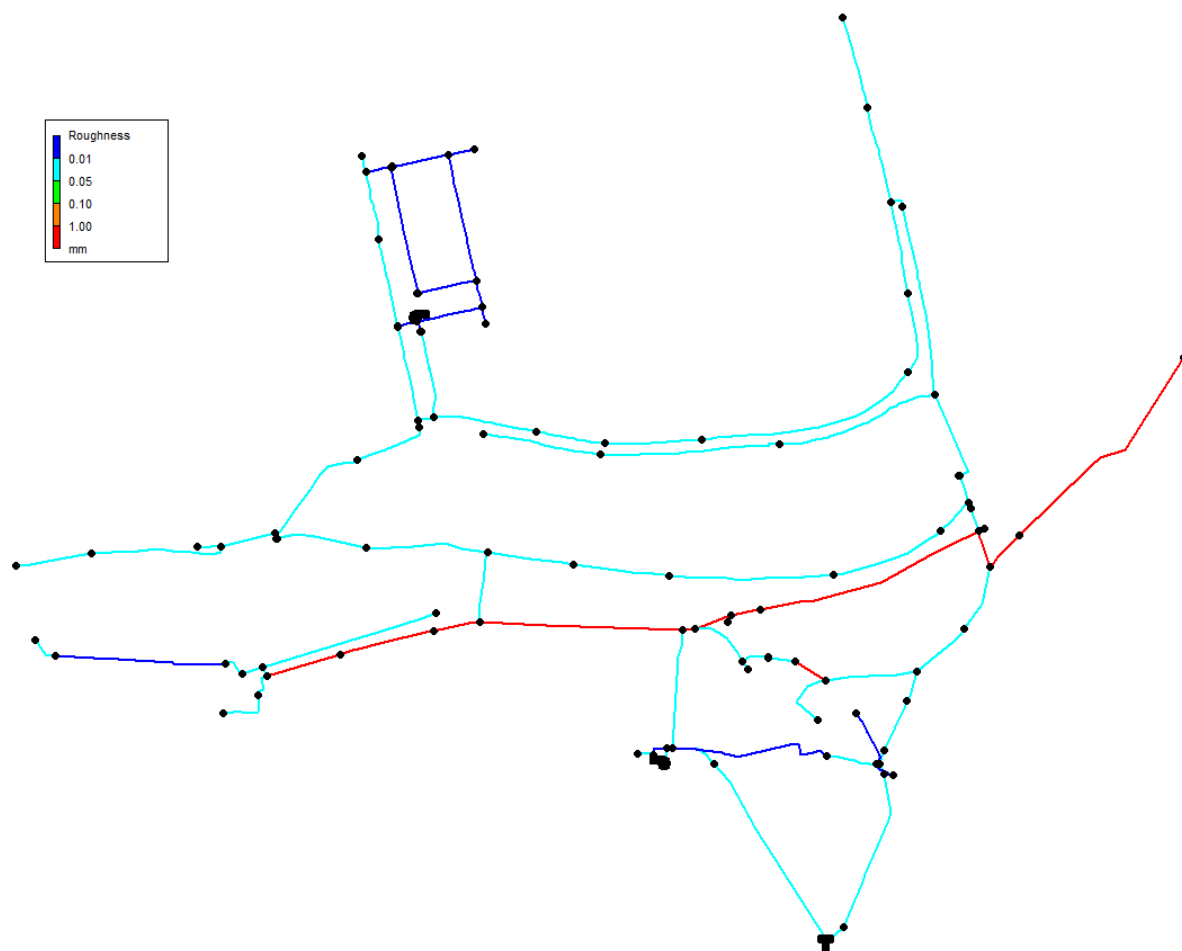
- Výkres sítí technického vybavení obce Tvarožná s geodetickým zaměřením, který poskytl SVK Šlapanicko
- Náčrt a tabulka použitých materiálů, DN a rok položení jednotlivých úseků. Tento podklad byl získán od SVK Šlapanicko.
- Údaje o vodojemu Tvarožná odečtené z provozního řádu VAS, a.s.
- Data o odečtu z vodoměru na přítoku do vodojemu Tvarožná (VAS, a.s.)
- Údaje o vykazování ztrát v rozvodné síti obce Tvarožná (VAS, a.s.)
- Naměřené hodnoty tlaků z provedené měrné kampaně

Hlavním podkladem k sestavení modelu vodovodní sítě obce Tvarožná byl výkres sítí technického vybavení v obci, který poskytl SVK Šlapanicko ve formátu *.dwg. Bylo nutné provést skeletonizaci sítě neboli rozdělení sítě na úseky vložením jednotlivých uzlů. Uzly byly vloženy do míst propojeného křížení potrubí, do bodů hydrantů, do míst, kde se mění profil nebo materiál potrubí. Dále byly uzly vloženy do dlouhých úseků tak, aby žádný úsek nebyl delší než 300 m. Informace o dimenzích, materiálech a stáří potrubí podal pan Ing. Hlaváč ze SVK Šlapanicko. Skeletonizovaná síť byla prostřednictvím softwaru MikeUrban vyexportována z formátu *.dwg. do formátu *.inp. Kostra modelu byla otevřena v programu Epanet 2.0 a dále bylo pracováno v tomto softwaru ve formátu *.net. Byla zachována topologie sítě, souřadnice X, Y jednotlivých uzlů a skutečné délky úseků v m z původního výkresu. V programu Epanet 2.0 byly nastaveny jednotky průtoku [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$] a pro výpočet tlakových ztrát třením po délce vztah dle Darcy-Weisbacha.

Ke všem úsekům bylo třeba doplnit dimenzi profilu potrubí v mm a hydraulickou drsnost materiálu potrubí v mm. Hydraulická drsnost materiálu byla zadávána na základě informací o typu a stáří materiálu. Hodnoty součinitele hydraulické drsnosti materiálu byly odečteny z tabulek pro výpočet dle vztahu Colebrook-White používaného pro vztah D-W. Hydraulická drsnost jednotlivých úseků je znázorněna na obr. 5-1.

K jednotlivým uzlům byly doplněny nadmořské výšky (viz obr. 5-2). Podkladem bylo geodetické zaměření ze zmíněného výkresu sítí technického vybavení nebo v několika málo případech odečtení z mapy.

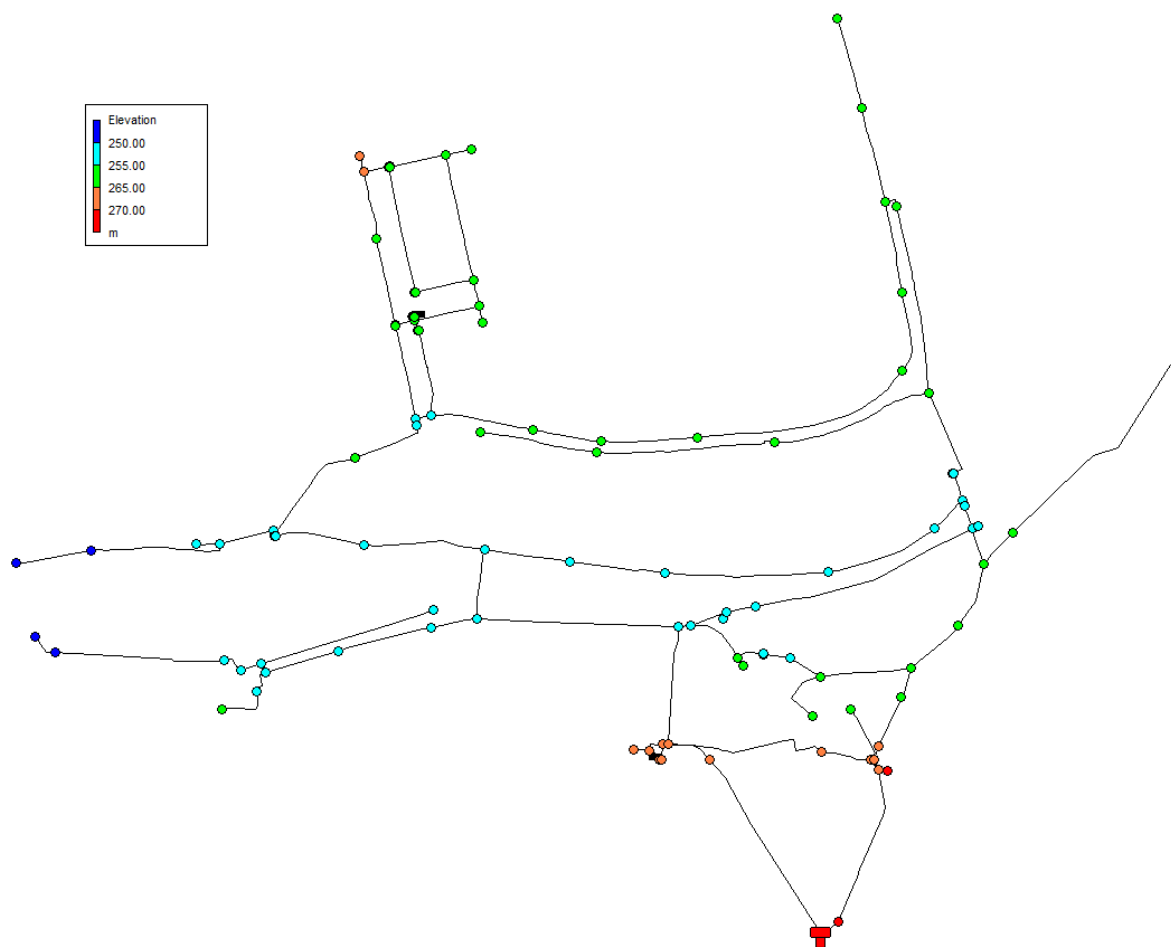
Bylo nutné do programu vložit vodojem a zadat jeho maximální a minimální hladinu vody v nádrži. Potřebné údaje byly získány z provozního řádu VAS, a.s.



Obr. 5-1 Hydraulická drsnost potrubí

Uzlové odběry byly vypočteny z průměrného denního průtoku Q_p . Ten byl stanoven z ročního rozdílu odečtu na vodoměru ve vodojemu Tvarožná na nátok do akumulární nádrže (viz kapitola 5.2 Zatěžovací stavy). Přesnější data o průtocích se bohužel nepodařilo zajistit. Informace o odečtech vodoměru poskytl provozovatel sítě VAS, a.s. Výpočet odběrů byl proveden pomocí metody dvou součinitelů, přičemž součinitel C_1 představoval počet přípojek (počet rodinných domů) a součinitel C_2 se rovnal jedné (viz kapitola 2.1.3 Zadávání odběrů). Po provedení výpočtu v programu Excel byly hodnoty jednotlivých odběrů přepsány do Epanetu k patřičným uzlům.

Do míst, kde jsou na vodovodní síti umístěny ATS byly vloženy úseky s čerpadlem. Q-H charakteristiky čerpadel byly určeny na základě zjištěných údajů o skutečných tlacích v jednotlivých tlakových pásmech sítě z provedené měrné kampaně. S tím také souviselo nalezení úseků, které jsou uzavřené, aby jednotlivá tlaková pásma nebyla propojená, ale aby se jednalo o samostatná uzavřená tlaková pásma. Na základě naměřených údajů o skutečných tlacích v jednotlivých tlakových pásmech byla kromě charakteristik čerpadel upravena také počáteční hladina ve vodojemu. Q-H charakteristiky čerpadel a počáteční hladina ve vodojemu byly nastaveny tak, aby se hodnoty simulovaných tlaků co nejvíce přiblížily hodnotám naměřeným na síti během měrné kampaně.



Obr. 5-2 Nadmořská výška uzlů

5.2 ZATĚŽOVACÍ STAVY

Pro hydraulickou analýzu byly stanoveny tři zatěžovací stavy, které byly simulovány v programu Epanet 2.0.

1. ZS: průměrný průtok Q_p

Průměrný průtok byl stanoven z ročního rozdílu stavu vodoměru ve vodojemu na přítoku do akumulární nádrže. Od VAS, a.s. byla poskytnuta data o měsíčních odečtech za poslední čtyři roky. Pro stanovení průměrného průtoku bylo vybráno roční období, ve kterém nedošlo k poruše nebo výměně vodoměru. V tabulce 5-1 jsou uvedeny stavy vodoměru s příslušným datem odečtu.

Tab. 5-1 Stav vodoměru na přítoku ve vodojemu Tvarožná

Datum	Stav vodoměru [m ³]
27. 10. 2015	7 405
27. 10. 2016	35 449

Rozdíl činí 28 044 m³.

$$Q_p = 78,83 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_p = 3,20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$Q_p = 0,89 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

2. ZS: minimální průtok v síti Q_{min}

Minimální průtok v rozvodné síti byl stanoven z průměrné ztráty vody. Údaje o vykazování ztrát vody za roky 2013 – 2015 poskytl provozovatel VAS, a.s. a jsou uvedeny v tabulce 5-2.

Tab. 5-2 Ztráty vody v rozvodné síti obce Tvarožná

Rok	Voda k realizaci [m ³]	Ztráty [m ³]	%
2013	23 923	4 570	19,1
2014	24 854	4 966	20,0
2015	28 107	6 356	22,6

Průměrné ztráty vody činí 5 297,3 m³/rok.

$$Q_{min} = 14,51 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{min} = 0,60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$Q_{min} = 0,17 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

3. ZS: maximální průtok v síti Q_h

Maximální průtok byl určen výpočtem z průměrného průtoku. Koeficienty nerovnoměrnosti k_d a k_h byly určeny odhadem dle charakteru obce z tabulky doporučených hodnot dostupné na webových stránkách www.vodovod.info. [26]

Koeficient denní nerovnoměrnosti $k_d = 1,40$

Koeficient hodinové nerovnoměrnosti $k_h = 2,0$

$$Q_d = Q_p \cdot k_d \tag{5.1}$$

$$Q_h = Q_d \cdot k_h \tag{5.2}$$

kde: Q_p ... průměrný denní průtok [m³·h⁻¹]

Q_d ... maximální denní průtok [m³·h⁻¹]

Q_h ... maximální hodinový průtok [m³·h⁻¹]

k_d ... koeficient denní nerovnoměrnosti [-]

k_h ... koeficient hodinové nerovnoměrnosti [-]

$$Q_h = 8,96 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$Q_h = 2,49 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tab. 5-3 Zatěžovací stavy

Zatěžovací stav	Průtok [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$]
1. ZS: Q_p	0,89
2. ZS: Q_{\min}	0,17
3. ZS: Q_h	2,49

Do modelu byly zatěžovací stavy zadány přes uzlové odběry. Jednotlivé uzlové odběry byly vypočteny a do modelu vloženy pro 1. ZS tedy pro Q_p . Pro druhé dva zatěžovací stavy se v Epanetu uzlové odběry upravily pomocí koeficientů, které vycházejí z poměrů daného zatěžovacího stavu a 1. ZS. Pro 2. ZS to je $Q_{\min}/Q_p = 0,189$ a pro 3. ZS se jednalo o hodnotu $Q_h/Q_p = 2,800$.

5.2.1 Tlakové poměry pro jednotlivé zatěžovací stavy

Všechna měřicí zařízení použitá při měrné kampani udávají výsledky v jednotkách [bar]. Program Epanet pracuje v jednotkách [m v. sl.]. Proto bylo nutné data o tlacích převést podle vztahu:

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (5.3)$$

kde: p ... tlak [$\text{Pa} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$]

ρ ... hustota vody při 4 °C [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

g ... gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

h ... výška vodního sloupce [m]

Pro převod jednotek tlaku platí:

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa} = 0,1 \text{ MPa} = 10,194 \text{ m v. sl.}$$

Pro sestavení modelu, resp. pro určení Q-H charakteristik čerpadel a počáteční hladiny ve vodojemu bylo nutné znát pro jednotlivé zatěžovací stavy tlakové poměry v každém tlakovém pásmu. Vycházelo se z měrné kampaně. Pro 1. ZS při průměrném průtoku je uvažován průměrný tlak. Pro 2. ZS při minimálním průtoku vzniká v síti maximální tlak, který se blíží hydrostatickému tlaku. Z naměřených údajů byl zjištěn čas, kdy ve všech třech tlakových pásmech dosahoval tlak nejvyšších mezí. To nastalo v sobotu 10. 12. 2016 v 5:30. Pro 3. ZS při maximálním hodinovém průtoku dochází v síti k největšímu poklesu tlaku. K takovému stavu došlo dle naměřených hodnot ve všech třech tlakových pásmech v sobotu 10. 12. 2016 v 19:30. Hodnoty tlaků jsou uvedeny v tabulce 5-4.

Tab. 5-4 Uvažované tlakové poměry pro zatěžovací stavy

ZS	Čas	1. TP		2. TP		3. TP	
		[bar]	[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]
1. ZS: Q_p	-	1,97	20,08	4,39	44,75	3,45	35,17
2. ZS: Q_{\min}	So 10/12/16 5:30	2,00	20,39	4,78	48,73	3,68	37,51
3. ZS: Q_h	So 10/12/16 19:30	1,91	19,47	4,01	40,88	3,15	32,11

5.3 PŘESNOST KALIBRACE MODELU

Přesnost kalibrace modelu se zjistí porovnáním naměřených hodnot tlaků při měrné kampani a simulovaných hodnot vypočtených v modelu. Porovnání naměřených a simulovaných hodnot ve všech třech tlakových pásmech při všech zatěžovacích stavech je znázorněno v následujících tabulkách 5-6, 5-7 a 5-8.

Tab. 5-5 Porovnání naměřených a simulovaných hodnot tlaků 1. TP

1. TP: lokalita Za Humny (gravitační)			
	Tlak [m v. sl.]		
ZS	Měření	Simulace	Rozdíl
1. ZS: Q_p	20,08	20,19	-0,11
2. ZS: Q_{min}	20,39	20,26	0,13
3. ZS: Q_h	19,47	19,80	-0,33

Tab. 5-6 Porovnání naměřených a simulovaných hodnot tlaků 2. TP

2. TP: lokalita Krhon (ATS škola)			
	Tlak [m v. sl.]		
ZS	Měření	Simulace	Rozdíl
1. ZS: Q_p	44,75	45,37	-0,62
2. ZS: Q_{min}	48,73	47,30	1,43
3. ZS: Q_h	40,88	40,60	0,28

Tab. 5-7 Porovnání naměřených a simulovaných hodnot tlaků 3. TP

3. TP: lokalita Cihelna (ATS Cihelna)			
	Tlak [m v. sl.]		
ZS	Měření	Simulace	Rozdíl
1. ZS: Q_p	35,17	35,54	-0,37
2. ZS: Q_{min}	37,51	36,56	0,95
3. ZS: Q_h	32,11	32,27	-0,16

Maximální zjištěná odchylka nepřesahuje 1,5 m v. sl. Z uvedených hodnot je možné konstatovat, že největší nepřesnosti způsobuje stanovení Q-H charakteristik čerpadel v ATS. V 1. TP, kde je voda dopravována gravitačně, je zjištěná odchylka podstatně nižší, maximálně 0,33 m v. sl.

Provedená kalibrace proběhla značně zjednodušeně, pro přesnější a objektivnější výsledky by bylo třeba měřit tlak v každém tlakovém pásmu na více místech. Pro ověření správnosti kalibrace by potom sloužila verifikace – porovnání simulovaných hodnot s novou sérií naměřených dat.

5.4 ZÁSOBOVÁNÍ POŽÁRNÍ VODOU

Pro účel hašení požáru je v obci vyhrazeno 8 hydrantů. Těchto 8 požárních hydrantů jsem rozdělila do dvou skupin: hydranty pro odběr $4 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ a hydranty pro odběr $6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Do skupiny hydrantů pro odběr $6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ jsem zařadila hydrant H2, který je požárním hydrantem nejméně vzdáleným od kostela, a hydrant H10, který je umístěn u kulturního domu. Do skupiny pro odběr $4 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ patří zbylých šest požárních hydrantů: H15, H19, H21, H30, H37 a H40. Tyto hydranty jsou rozmístěny po obci a slouží pro požární ochranu rodinných domů. Umístění hydrantů viz příloha 2 – Hydrantová mapa.

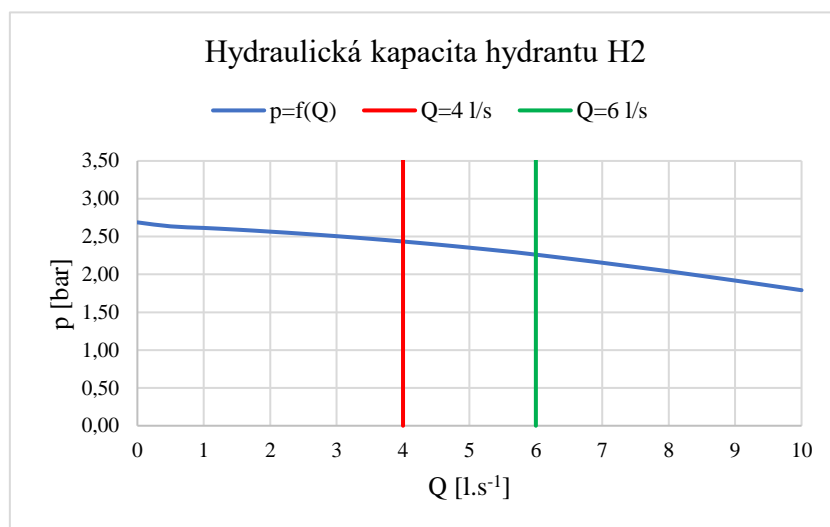
Hydrostatický tlak na požárních hydrantech byl posouzen při 2. ZS, kdy je průtok v síti minimální a tlak téměř odpovídá hydrostatickému tlaku.

Hydraulická kapacita hydrantů byla určena při 3. ZS, tedy pro Q_h , kdy jsou hodnoty odběrů ze sítě největší, a proto je tento zatěžovací stav pro odběr požární vody nejnepríznivější. Odběr požární vody z jednotlivých hydrantů byl postupně navyšován o $0,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ až po maximální možný odběr při dodržení podmínky minimálního požadovaného tlaku $0,05 \text{ MPa}$, jak udává ČSN 73 0873 [27]. Postupně byl simulován požární odběr ze všech požárních hydrantů. Výsledkem těchto simulací jsou níže uvedené grafy 5-1 až 5-8 závislosti hydrodynamického tlaku na velikosti odběru vody a tabulka 5-5 s uvedenými maximálními hodnotami odběrů.

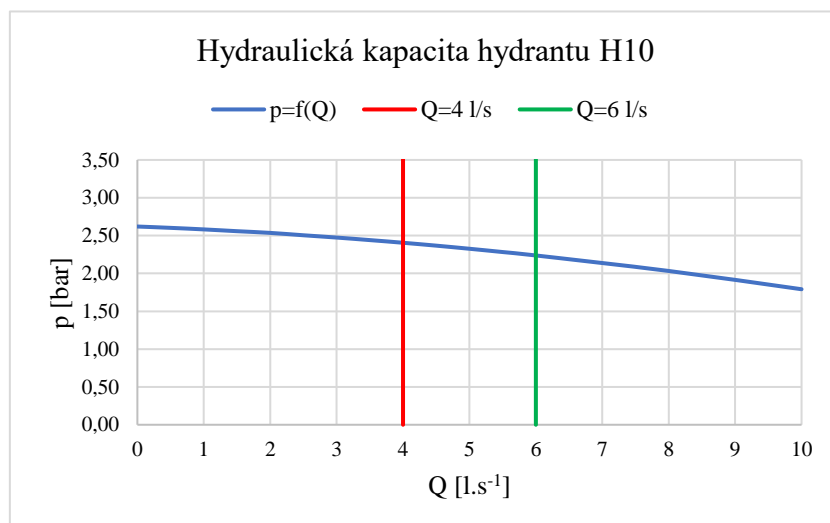
Tab. 5-8 Přehled hydraulických kapacit požárních hydrantů

Hydrant	Maximální odběr $Q_{\max} [\text{l} \cdot \text{s}^{-1}]$	Tlak $p [\text{bar}]$
H2	17,4	0,50
H10	17,8	0,50
H15	18,4	0,50
H19	11,6	0,52
H21	16,8	0,51
H30	14,8	0,51
H37	15,8	0,50
H40	15,4	0,50

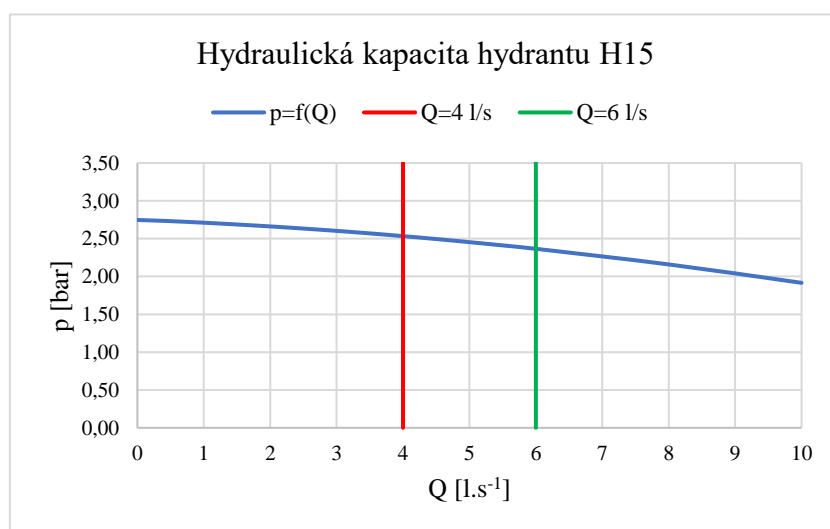
Graf 5-1 Hydraulická kapacita hydrantu H2



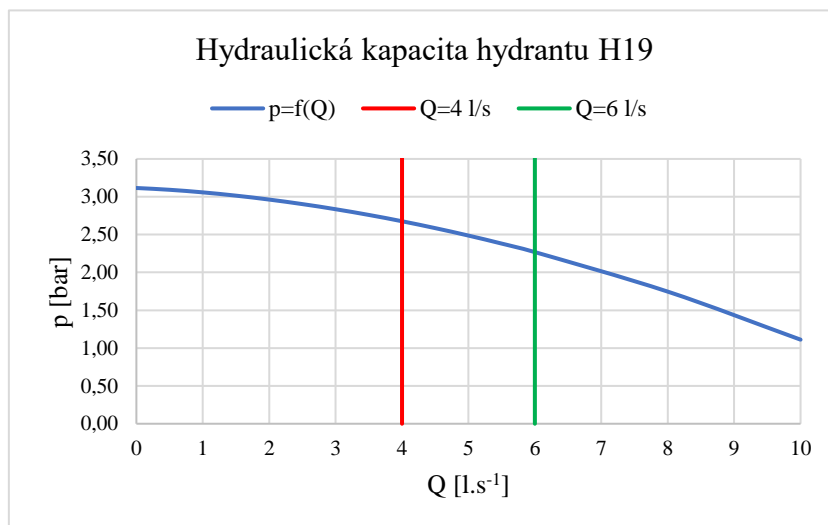
Graf 5-2 Hydraulická kapacita hydrantu H10



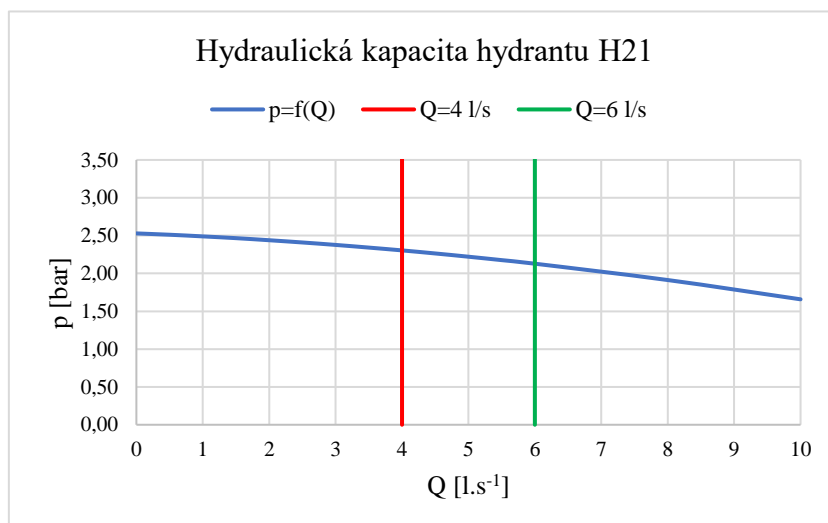
Graf 5-3 Hydraulická kapacita hydrantu H15



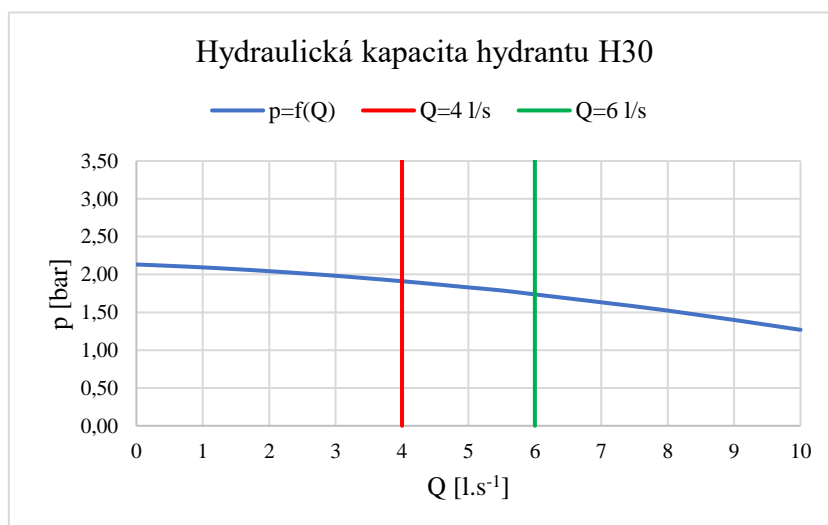
Graf 5-4 Hydraulická kapacita hydrantu H19



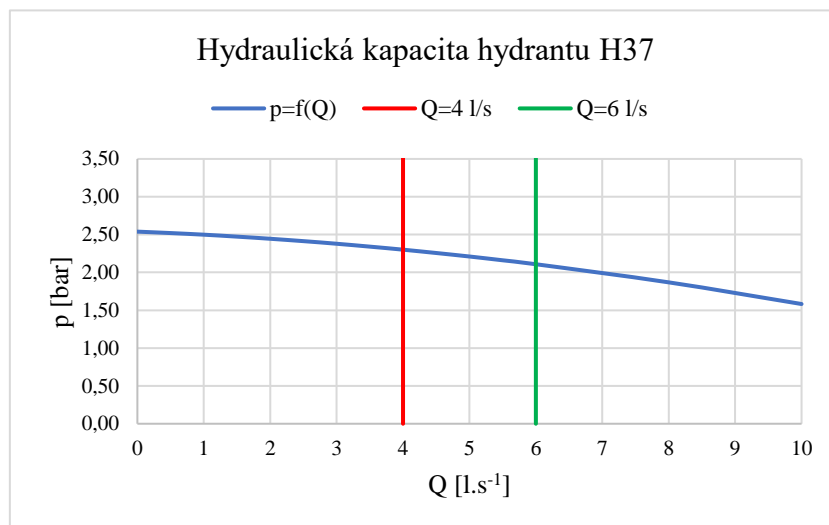
Graf 5-5 Hydraulická kapacita hydrantu H21



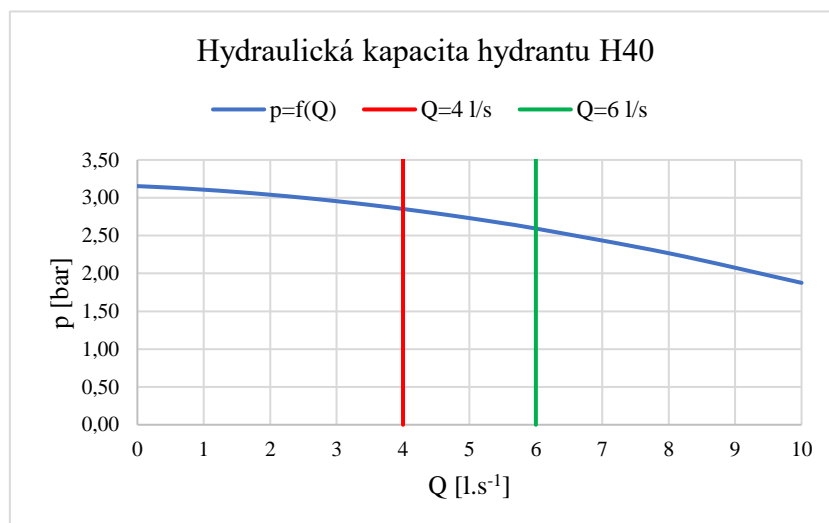
Graf 5-6 Hydraulická kapacita hydrantu H30



Graf 5-7 Hydraulická kapacita hydrantu H37



Graf 5-8 Hydraulická kapacita hydrantu H40



5.5 LEGISLATIVNÍ POŽADAVKY

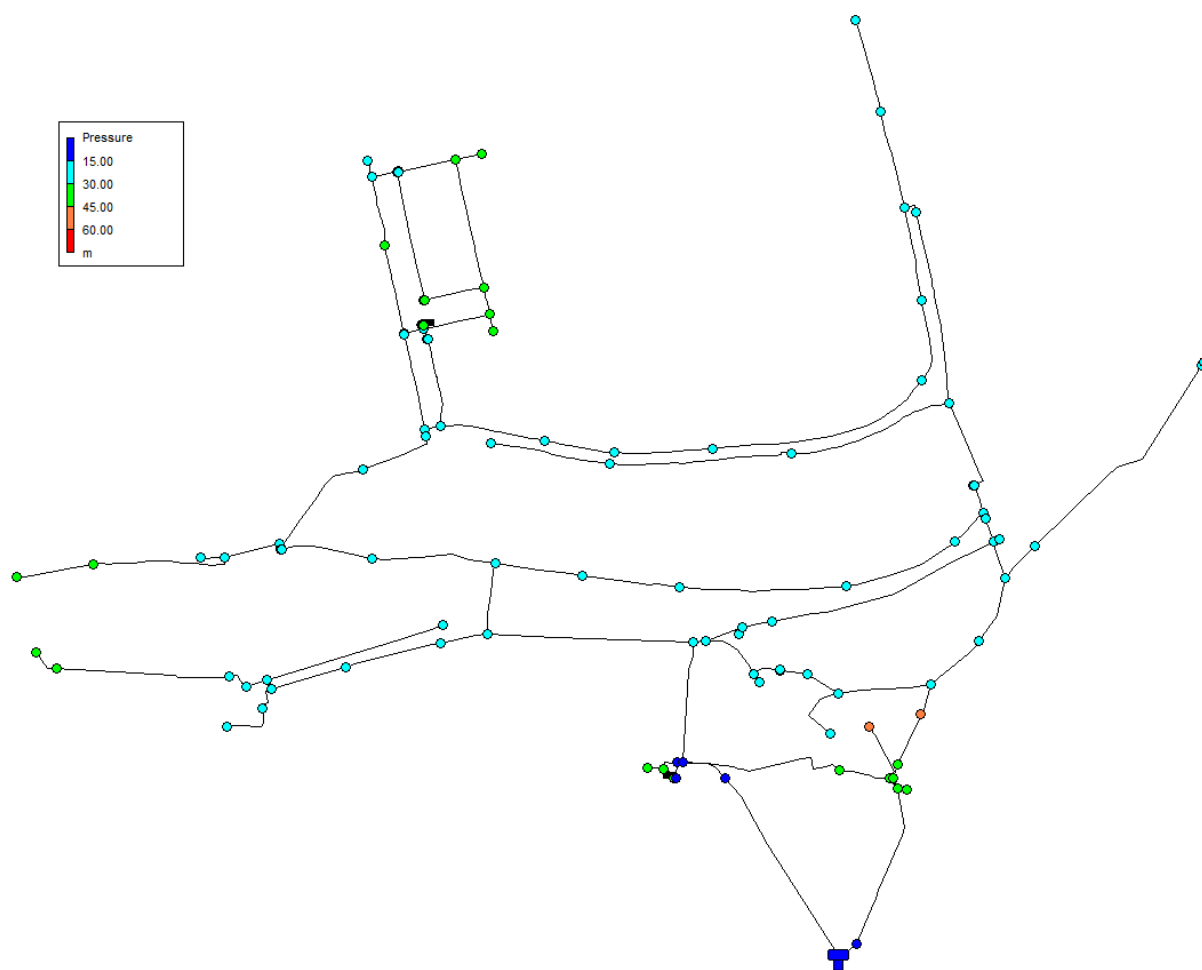
Návrh a provoz vodovodu musí odpovídat právním požadavkům. Ty stanovuje vyhláška MZe č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů. Maximální hydrostatický přetlak ve vodovodní síti každého tlakového pásma nesmí převyšovat hodnotu 0,6 MPa (tj. 61,16 m v. sl.) v odůvodněných případech 0,7 MPa (tj. 71,36 m v. sl.). Minimální hydrodynamický přetlak v rozvodné síti při zástavbě do dvou nadzemních podlaží musí být v místě napojení přípojky nejméně 0,15 MPa (tj. 15,29 m v. sl.). V případě zástavby nad dvě nadzemní podlaží nejméně 0,25 MPa (tj. 25,48 m v. sl.). [24]

Pro požární bezpečnost staveb musí vodovod splňovat požadavky na zásobování požární vodou. ČSN 73 0873 Požární bezpečnost staveb – Zásobování požární vodou uvádí, že hydrostatický přetlak v místě požárního hydrantu má být 0,2 MPa (tj. 20,39 m v. sl.). V případě odběru požární vody by tlak neměl klesnout pod hodnotu 0,05 MPa (tj. 5,10 m v. sl.). Pro

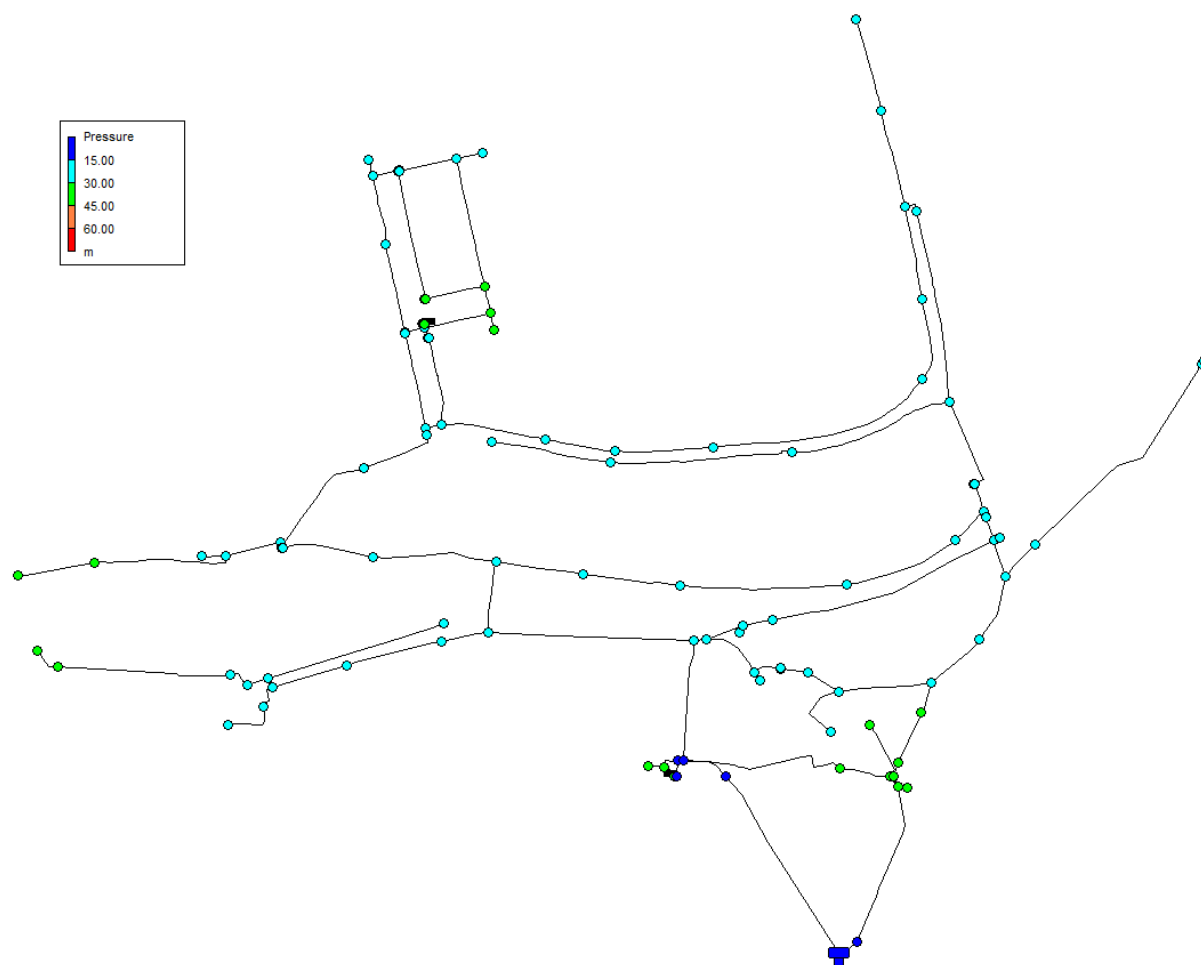
rodinné domy do plochy 200 m² a nevýrobní objekty (kromě skladů) do plochy 120 m² mají být požární hydranty umístěny maximálně 200 m od objektů a maximální vzdálenost mezi jednotlivými hydranty má být 400 m. V tomto případě musí mít potrubí pro požární účely minimální profil 80 mm a musí zajišťovat odběr 4 l/s. Pro nevýrobní objekty o ploše od 120 m² do 1000 m² mají být požární hydranty umístěny 150 m od objektů a maximálně 300 m od sebe navzájem. Minimální profil požárního potrubí je v tomto případě 100 mm a musí zajistit odběr 6 l/s. [27]

5.6 POSOUZENÍ TLAKOVÝCH POMĚRŮ VODOVODNÍ SÍTĚ OBCE TVAROŽNÁ

Výsledky provedené hydraulické analýzy stávající vodovodní sítě obce Tvarožná ukazují, že tlaky vyskytující se v síti splňují požadavky dané zákonem. V žádném případě nedochází k překročení maximální hodnoty pro hydrostatický tlak (viz obr.5-3). Hodnota pro minimální hydrodynamický tlak v místě napojení přípojky uvedená ve vyhlášce, nebyla v simulaci vodovodní sítě obce Tvarožná podkročena, nicméně hodnoty minimálních tlaků se z velké části pohybují těsně nad touto hodnotou (viz obr. 5-4). Přehled dosahovaných minimálních a maximálních tlaků je znázorněn v příloze č. 3 a v příloze č. 4.



Obr. 5-3 Schéma maximálních tlaků v síti



Obr. 5-4 Schéma minimálních tlaků v síti

V 1. TP se hodnoty tlaků pohybují nad mezí pro minimální hydrodynamický tlak. Minimální tlak, který byl v modelu vypočten je hodnota 16,25 m v.sl. což je 0,16 MPa, který nastal při 3. ZS na konci ulice Sivická. Další místa s takto limitním tlakem jsou v 1. TP u kostela a na Krhoně. Tlak v téměř celém 1. TP se pohybuje kolem hodnoty 0,20 MPa. Maximální tlak v 1. TP, kterého bylo dosaženo během 2. ZS, je 32,60 m v. sl., tedy 0,32 MPa v nejnižší položeném místě obce v ulici U Hřiště.

V 2. TP, kde je tlak vody navyšován ATS v budově školy, se tlak pohybuje v rozmezí cca 0,35 MPa až 0,45 MPa. Minimální tlak 34,60 m v. sl. tj. 0,34 MPa v 2. TP nastává v nejvyšší položeném místě. Maximální hodnota tlaku v tomto tlakovém pásmu 47,30 m. v. sl. tj. 0,46 MPa byla vypočtena na místě, kde bylo osazeno tlakové čidlo.

V 3. TP se tlak pohybuje cca v rozmezí 0,20 MPa až 0,30 MPa. Minimální dosažená hodnota tlaku v tomto tlakovém pásmu je 22,85 m v.sl., tedy 0,22 MPa na konci ulice Hlinky. Nejvyšší dosažené hodnoty tlaku 36,56 m v. sl. tj. 0,36 MPa jsou dosahovány v nejnižších polohách zástavby V Cihelně.

5.7 POSOUZENÍ NA ZÁSOBOVÁNÍ POŽÁRNÍ VODOU

Pomocí sestaveného modelu byly posouzeny požární hydranty na požadavky dané normou ČSN 73 0873. Z hlediska hydrostatického tlaku všechny požární hydranty vyhovují, tzn. tlak je ve všech případech vyšší než minimální hodnota 0,20 MPa tj. 2,00 bar. Hydrodynamický tlak na hydrantu během odběru požární vody v žádném případě neklesne pod minimální hodnotu 0,05 MPa, tj. 0,5 bar. [27] Hodnoty hydrostatického tlaku a hydrodynamického tlaku během odběru na jednotlivých požárních hydrantech jsou uvedeny v tabulce 5-9. Vlivem odběru požární vody z hydrantu ovšem dochází k poklesu tlaku v ostatních uzlech distribuční sítě. Místy dochází k poklesu tlaku pod minimální hodnotu 0,15 MPa [24].

Co se týče umístění požárních hydrantů, v některých případech jsou požární hydranty vzdáleny od objektů více než 200 m a od sebe navzájem více než 400 m, jak určuje norma. Jde především o zástavbu V Cihelně, vzdálenější polovinu ulice Hlinky, část ulice Za Humny a nejvzdálenější domy části Krhon. Budovy ZŠ a MŠ jsou od nejbližšího požárního hydrantu vzdáleny po nejpravděpodobnější trase zásahu cca 300 m. [27]

Tab. 5-9 Posouzení požárních hydrantů

Hydrant	Umístění	Světlost DN potrubí	Světlost DN hydrantu	Hydrostatický tlak [bar]	Odběr $Q_{pož}$ [l·s ⁻¹]	Hydrodynamický tlak [bar]	Vyhovuje
H2	u čp. 82	150 TL	80	2,69	6	2,26	ANO
H10	u čp. 223	100 PVC	80	2,66	6	2,24	ANO
H15	u čp. 1	150 PVC	80	2,79	4	2,53	ANO
H19	u čp. 326	80 PVC	80	3,16	4	2,68	ANO
H21	u čp. 163	150 PVC	80	2,57	4	2,30	ANO
H30	u čp. 332	150 PVC	80	2,18	4	1,91	ANO
H37	u čp. 99	100 PVC	80	2,58	4	2,30	ANO
H40	u čp. 364	100 LPE	80	3,20	4	2,85	ANO

5.8 DOPORUČENÍ

Tlakové poměry v 1. TP, které je z vodojemu zásobováno gravitačně, se pohybují z velké části těsně nad minimální hodnotou danou vyhláškou č. 428/2001 Sb. [24]. Tento stav by vyřešila posilovací čerpací stanice nebo nový vodojem umístěný ve vyšší nadmořské výšce. To by bylo v souladu s dlouhodobou koncepcí rozvoje tohoto vodovodu, která počítá z důvodu plánovaného budoucího rozšíření výstavby na severu obce s výstavbou nového vodojemu v lokalitě nad ulicí Hlinky severně od obce Tvarožná cca o 20 m výše, než je vodojem současný [28].

Z důvodu velkých vzdáleností požárních hydrantů od některých objektů a od sebe navzájem bych doporučila navýšit celkový počet požárních hydrantů. Mezi požární hydranty bych zařadila hydrant H24 u č.p. 275 a H26 u č.p. 202 v blízkosti sokolovny v ulici Za Humny, dále

hydrant H40 poblíž ZŠ u č.p. 263, hydrant H46 u č.p. 209 v části Krhon a na konci ulice Hlinky u č.p. 382 hydrant H51.

6 ZÁVĚR

Hydraulická analýza vodovodních distribučních systémů se používá k získávání důležitých údajů o průtokových a tlakových poměrech v těchto systémech, a to zejména pro optimalizaci provozu a řízení stávajících vodovodních sítí, pro projekci nových vodovodních sítí, pro možné rozšiřování systémů nebo rekonstrukci stávajících sítí [1]. Hydraulická analýza je jedním z příkladů využití matematického modelování.

Obsahem bakalářské práce je úvod do matematického modelování vodovodních sítí. Rozděluje hydraulickou analýzu na tři základní typy. Podává přehled o vstupních datech a nutných zjednodušeních, která jsou pro tvorbu modelu potřebná. Definiuje základní podmínky analýzy vodovodních okružových sítí. Blíže charakterizuje nejpoužívanější softwarový program Epanet, který je světově nejrozšířenějším výpočetním modelem pro hydraulickou analýzu, a který byl použit jako hlavní program k sestavení modelu v rámci praktické části. Dále tato práce nabízí náhled do současného stavu výzkumu v oblasti matematického modelování vodovodních sítí.

V úvodu do praktické části práce je blíže popsána zájmová lokalita obec Tvarožná. Je podrobně přiblížen způsob zásobování obce pitnou vodou. Základní informace o zdrojích vody, rozváděcích řadech v obci, objektech, požárních hydrantech, jakosti vody atp. byly získány od vlastníka vodovodu SVK Šlapanicko, obce Tvarožná a VAS, a.s, která je provozovatelem tohoto vodovodu. Součástí získávání podkladů byla i měrná kampaň. V každém tlakovém pásmu rozvodné sítě obce bylo osazeno do podzemního hydrantu tlakové čidlo, které měřilo tlak po 15 sekundách cca 55 hodin. Měření je v rámci práce vyhodnoceno a jeho výsledky byly použity ke kalibraci.

Cílem bakalářské práce bylo sestavení hydraulického modelu rozvodné vodovodní sítě obce Tvarožná v programu Epanet 2.0. Vstupní data a průběh sestavování modelu je v práci podrobně popsán. Výsledkem hydraulické analýzy je přehled minimálních a maximálních tlaků ve vodovodní síti, které byly posouzeny s ohledem na platnou legislativu ČR. Výsledky ukázaly, že tlakové poměry v 1. TP se v některých místech pohybují těsně nad minimální povolenou hodnotou, kterou stanovuje vyhláška MZe č. 428/2001 Sb. [24] Praktická část práce se zabývala také zhodnocením požární bezpečnosti staveb z hlediska zásobování požární vodou. Byly posouzeny hydraulické kapacity požárních hydrantů, jejich počet a rozmístění s ohledem na požadavky normy ČSN 73 0873. Výsledky ukázaly, že všechny požární hydranty vyhovují na tlakové požadavky [27]. Nicméně některé rodinné domy a objekty jsou od požárních hydrantů umístěny ve větší vzdálenosti, než norma předepisuje.

Bakalářská práce splnila stanovené cíle uvedené v její úvodní části. Byl sestaven matematický model a provedena hydraulická analýza vodovodní sítě obce Tvarožná. Bylo simulováno několik zatěžovacích stavů. Byly posouzeny výsledné tlakové poměry a vodovodní síť byla zhodnocena s ohledem na zásobování požární vodou. Pod podmínkou detailnější kalibrace a následné verifikace by výsledky práce mohly posloužit pro optimalizaci provozu a řízení vodovodní sítě nebo při zpracování nového požárního řádu či krizového plánu obce.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KUČERA, Tomáš. Hydraulická analýza vodovodních sítí. Vodovod.info - vodárenský informační portál[online]. Dostupný z WWW: <http://www.vodovod.info>. ISSN 1804-7157.
- [2] HŘEBÍČEK, Jiří a Michal ŠKRDLA. Úvod do matematického modelování [online]. Masarykova univerzita, 2006 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/Bi3101/um/skripta.pdf>
- [3] TUHOVČÁK, Ladislav, Pavel ADLER, Tomáš KUČERA, Jaroslav RACLAVSKÝ. *Vodárenství*. Brno: Vysoké učení technické, 2006.
- [4] INGEDULD, Petr a Jarmil VYČÍTAL. Matematické modelování vodovodních sítí, část III. *SOVAK: časopis oboru vodovodů a kanalizací* [online]. 1999, 1999(05) [cit. 2017-03-27]. ISSN 1210-3039. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/ris/ais-ris-info-copy.nsf/>
- [5] PALUSZCZYSZYN, Daniel, Piotr SKWORCOW a Bogumil ULANICKI. Modelling and simulation of water distribution systems with quantised state system methods. *Procedia Engineering*. 2015, (119), 554-563. ISSN 1877-7058.
- [6] INGEDULD, Petr a Jarmil VYČÍTAL. Matematické modelování vodovodních sítí *SOVAK: časopis oboru vodovodů a kanalizací* [online]. 1999, 1999(03) [cit. 2017-03-27]. ISSN 1210-3039. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/ris/ais-ris-info-copy.nsf/>
- [7] ROSSMAN, Lewis A. *EPANET 2: USERS MANUAL*. Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 2000
- [8] HOFMANNOVÁ, Lenka. *Hydraulická analýza vodovodní sítě sídliště Brno - Bystrc*. Brno, 2014. 68 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.
- [9] SUNELA, Markus I. a Raido PUUST. Real time water supply system hydraulic and quality modeling – a case study. *Procedia Engineering*. 2015a, (119), 744-752. ISSN 1877-7058.
- [10] SUNELA, Markus I. a Raido PUUST. Modeling water supply system control system algorithms. *Procedia Engineering*. 2015b, (119), 734-743. ISSN 1877-7058.
- [11] IGLESIAS-REY, P.L., F.J. MARTÍNEZ-SOLANO a J.V. RIBELLES-AQUILAR. Extending EPANET capabilities with Add-In Tools. *Procedia Engineering*. 2017, (186), 626-634. ISSN 1877-7058.
- [12] ELIADES, D.G., T.P. LAMBROU, C.G. PANAYIOTOU a M.M. POLYCARPOU. Contamination Event Detection in Water Distribution Systems using a Model-Based Approach. *Procedia Engineering*. 2014, (89), 1089-1096. ISSN 1877-7058.

- [13] KOC, Abdullah C., Umut S. DEMIR a Selcuk TOPRAK. Earthquake Vulnerability of Water Distribution Systems from Topology Perspective. *Civil Engineering*. 2016, (18). ISSN 1877-7058.
- [14] MAZZOLANI, Gianfredi, Luigi BERARDI, Daniele LAUCELLI, Riccardo MARTINO, Antonietta SIMONE a Orazio GIUSTOLISI. A methodology to estimate leakages in water distribution networks based on inlet flow data analysis. *Procedia Engineering*. 2016, (162), 411-418. ISSN 1877-7058.
- [15] SOPHOCLEOUS, S., D. SAVIC, Z. KAPELAN, Y. SHEN a P. SAGE. Advances in water mains network modelling for improved operations. *Procedia Engineering*. 2015, (119), 593-602. ISSN 1877-7058.
- [16] MONTEIRO, L., D. FIGUEIREDO, S. DIAS, R. FREITAS, D. COVAS, J. MENAIA a S. T. COELHO. *Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX* [online]. 2014, (70), 1192-1200. ISSN 1877-7058.
- [17] Tvaroženský zpravodaj. obec Tvarožná, 2017, 45(1).
- [18] Územní plán obce Tvarožná. obec Tvarožná, 2004.
- [19] *Mapy.cz* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=16.6193699&y=49.0566281&z=10&q=Tvaro%C5%BEn%C3%A1>
- [20] *Provozní řád. VODÁRENSKÁ AKCIOVÁ SPOLEČNOST, a.s. Brno*, 2016.
- [21] *Mapy Google* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/@49.1927115,16.7735439,835m/data=!3m1!1e3>
- [22] Vyhláška MZ č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody
- [23] Tvrdost vody. *VODÁRENSKÁ AKCIOVÁ SPOLEČNOST, a.s.* [online]. [cit. 2016-09-15]. Dostupné z: <http://www.vodarenska.cz/file/593/>
- [24] Vyhláška MZe č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích)
- [25] Stupnice tvrdosti vod. *VODÁRENSKÁ AKCIOVÁ SPOLEČNOST, a.s.* [online]. [cit. 2019-09-15]. Dostupné z: <http://www.vodarenska.cz/file/593/>
- [26] Potřeba vody - koeficienty nerovnoměrnosti. Vodovod.info: vodárenský portál [online]. 2014 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://www.vodovod.info/index.php/tabulky/217-potreba-vody-koeficienty-nerovnomernosti#.WSNFhmjyIU>
- [27] ČSN 73 0873. Požární bezpečnost staveb - Zásobování požární vodou. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2003.
- [28] *Návrh územního plánu obce Tvarožná*. obec Tvarožná, 2017.

SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1 Seznam požárních hydrantů obce Tvarožná (sdělení Ing. P. Buchta, starosta obce Tvarožná)	28
Tab. 3-2 Stupnice tvrdosti vod [25]	31
Tab. 3-3 Krácené rozborý vody z rozvodné sítě v obci Tvarožná (sdělení Ing. M. Doležalová, VAS, a.s.)	32
Tab. 4-1 Výsledky měření tlaků ve vodovodní síti	35
Tab. 5-1 Stav vodoměru na přítoku ve vodojemu Tvarožná.....	38
Tab. 5-2 Ztráty vody v rozvodné síti obce Tvarožná	39
Tab. 5-3 Zatěžovací stavy	40
Tab. 5-4 Uvažované tlakové poměry pro zatěžovací stavy.....	40
Tab. 5-5 Porovnání naměřených a simulovaných hodnot tlaků 1. TP	41
Tab. 5-6 Porovnání naměřených a simulovaných hodnot tlaků 2. TP	41
Tab. 5-7 Porovnání naměřených a simulovaných hodnot tlaků 3. TP	41
Tab. 5-8 Přehled hydraulických kapacit požárních hydrantů.....	42
Tab. 5-9 Posouzení požárních hydrantů	48

SEZNAM GRAFŮ

Graf 5-1 Hydraulická kapacita hydrantu H2	43
Graf 5-2 Hydraulická kapacita hydrantu H10	43
Graf 5-3 Hydraulická kapacita hydrantu H15	43
Graf 5-4 Hydraulická kapacita hydrantu H19	44
Graf 5-5 Hydraulická kapacita hydrantu H21	44
Graf 5-6 Hydraulická kapacita hydrantu H30	44
Graf 5-7 Hydraulická kapacita hydrantu H37	45
Graf 5-8 Hydraulická kapacita hydrantu H40	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Schéma zásobování obce Tvarožná pitnou vodou (sdělení Ing. V. Vavřinová, VAS, a.s.)	10
Obr. 2-1 Časová a stavová diskretizace spojitého průběhu systému [5]	20
Obr. 3-1 Poloha obce Tvarožná na území České republiky [19]	22
Obr. 3-2 Poloha obce Tvarožná v okrese Brno-venkov [19]	22
Obr. 3-3 Vodojem Mokrý - trubní vystrojení	24
Obr. 3-4 Dezinfekce vody ve vodojemu Mokrý	26
Obr. 3-5 Materiály a profily potrubí rozvodné vodovodní sítě [21] (sdělení Ing. P. Hlaváč, SVK Šlapanicko)	27
Obr. 3-6 Umístění požárních hydrantů [21] (sdělení Ing. P. Buchta, starosta obce Tvarožná)	29
Obr. 3-7 Vodojem Tvarožná - trubní vystrojení	30
Obr. 3-8 Vodoměr na přítoku ve vodojemu Tvarožná	30
Obr. 4-1 Místa měření [21]	33
Obr. 4-2 Osazení tlakových čidel: Sensus COSMOS 2U Datalogger (vlevo) a Drulo II (vpravo)	33
Obr. 4-3 Průběh naměřených tlaků v 1.TP (lokalita Za Humny)	34
Obr. 4-4 Průběh naměřených tlaků v 2.TP (lokalita Krhon)	34
Obr. 4-5 Průběh naměřených tlaků v 3.TP (lokalita Cihelna)	35
Obr. 5-1 Hydraulická drsnost potrubí	37
Obr. 5-2 Nadmořská výška uzlů	38
Obr. 5-3 Schéma maximálních tlaků v síti	46
Obr. 5-4 Schéma minimálních tlaků v síti	47

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ATS	automatická tlaková stanice
C_1	počet zásobovaných obyvatel, bytových jednotek, plocha zástavby
C_2	specifická potřeba na účelovou jednotku použitou v rámci C_1
C30/37	třída pevnosti betonu, maximální charakteristická válcová pevnost [MPa]/maximální charakteristická krychelná pevnost [MPa]
ČS	čerpací stanice
ČSN	Česká technická norma
d	vnitřní průměr potrubí [m]
DDM	model řízený odběrem (Demand Driven Model)
DN ...	jmenovitá světlost
D-W	rovnice dle Darcy-Weisbacha
g	gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
H	tlaková výška [m]
h	tlaková ztráta [m]; výška vodního sloupce [m]
H-W	rovnice dle Hazen-Williamse
CHKO	chráněná krajinná oblast
K	odporový součinitel příslušného úseku
k_d	koeficient denní nerovnoměrnosti [-]
k_h	koeficient hodinové nerovnoměrnosti [-]
L	skutečná délka úseku [m]
L	délka úseku [m]
LPE	lineární polyetylen
L_r ...	redukovaná délka úseku [m]
MZ	ministerstvo zdravotnictví
MZe	ministerstvo zemědělství
OC	ocel
p	tlak [$\text{Pa} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$]
PE	polyetylen
P_i	součin součinitelů C_1 a C_2 pro i -tý úsek [-]
PVC	polyvinylchlorid
Q	průtok

$Q_c \dots$	celková potřeba spotřebiště [$m^3 \cdot s^{-1}$]
Q_d	maximální denní průtok [$m^3 \cdot h^{-1}$]
Q_h	maximální hodinový průtok [$m^3 \cdot h^{-1}$]
Q_i	odběr i-tého úseku [$m^3 \cdot s^{-1}$], průtok v i-tém úseku stanovený v posledním kroku řešení [$m^3 \cdot s^{-1}$]
Q_i'	průtok v i-tém úseku stanovený v předposledním kroku řešení [$m^3 \cdot s^{-1}$]
Q_{max}	maximální odběr [$l \cdot s^{-1}$]
Q_{min}	minimální průtok
Q_p	průměrný denní průtok [$m^3 \cdot h^{-1}$]
q_r	specifická potřeba [$m^2 \cdot s^{-1}$]
QSS	kvantový stavový systém (quantised state system)
QSS1	QSS metoda s konstantním průběhem kvantizační funkce
QSS1	QSS metoda s parabolickým průběhem kvantizační funkce
QSS2	QSS metoda s lineárním průběhem kvantizační funkce
S_r	celková redukováná délka sítě [m]
SV	skupinový vodovod
SVK	Svazek pro vodovody a kanalizace
TL	tlaková litina šedá
TLT	tlaková litina tvárná
TP	tlakové pásmo
U.S. EPA	Agentura pro ochranu životního prostředí USA (United States Enviromental Protection Agency)
v	průřezová rychlost proudění při průtoku Q [$m \cdot s^{-1}$]
VAS, a.s.	Vodárenská akciová společnost, a.s.
VDJ	vodojem
VZ	vodní zdroj
ZS	zatěžovací stav
λ	součinitel ztát třením [-]
ρ	hustota vody při 4 °C [$kg \cdot m^{-3}$]
Σh	součet tlakových ztrát
ΣQ_i	součet odtoků a přítoků

SEZNAM PŘÍLOH

1. Přehledná situace vodovodní sítě obce Tvarožná (M 1:2500)
2. Hydrantová mapa (M 1:4000)
3. Přehled minimálních tlaků v síti
4. Přehled maximálních tlaků v síti

SUMMARY

The issue of the bachelor thesis is an introduction to the mathematical modeling of water distribution system. It divides the hydraulic analysis into three basic types. It provides an overview of the input data and the necessary simplifications that are needed to the model setting. Thesis defines the essential conditions for the circular water distribution system analysis. Software Epanet which is the world's most widely used computational model for hydraulic analysis is characterized in detail. Epanet was used as the main program to build a water distribution system model in a practical part of the thesis. Further, this work presents an overview of the current state of research on mathematical modeling of water distribution system topic.

The locality of interest Tvarožná is described in the introduction to the practical part of the thesis. The current situation of supplying the village with drinking water is described in detail. Basic information about water sources, distribution lines in the village, buildings, fire hydrants, water quality, etc. were obtained from the owner of the water distribution system SVK Šlapanicko, from the municipality of Tvarožná or VAS a.s. which is the operator of this water distribution system. A measuring campaign was also part of the practical part of the thesis. A pressure sensor was placed in the underground hydrant in every pressure zone of the water distribution system of the village. Sensors measured the pressure at 15 seconds intervals for about 55 hours. Measurements were evaluated and the results were used for calibration of the model.

The aim of the practical part of the thesis was to create a hydraulic model of the Tvarožná water distribution system in the Epanet 2.0 software. The input data and the process of the model compilation are described in detail. The results of the hydraulic analysis are overviews of the minimum and maximum pressures in the water distribution system. Results were compared to the valid legislation of the Czech Republic. Results showed that the pressure states in the 1st pressure zone are in some places just above the minimum allowed value, which is determined by the decree of the MZe no. 428/2001 [24]. Further practical part of the thesis evaluated the fire safety of buildings compared with fire water supply. Concretely the hydraulic capacities of the fire hydrants, their number, and their deployment were compared to the requirements of ČSN 73. The results confirmed that all fire hydrants meet the pressure requirements [27]. However, some family houses and buildings are at an insufficient distance from the fire hydrants according to the ČSN 73 requirements.

The bachelor thesis fulfilled the aims that were stated in the introduction. A mathematical model was designed using Epanet software and a hydraulic analysis of the Tvarožná water distribution system was performed. Several load cases were simulated. The resulting pressures states were assessed and the actual water distribution system was evaluated with regard to the supply of fire water. If more detailed calibration and subsequent verification are used, the results of the thesis will serve to optimize the operation and improve management of the water distribution system or to design a new fire protection plan for the Tvarožná village.